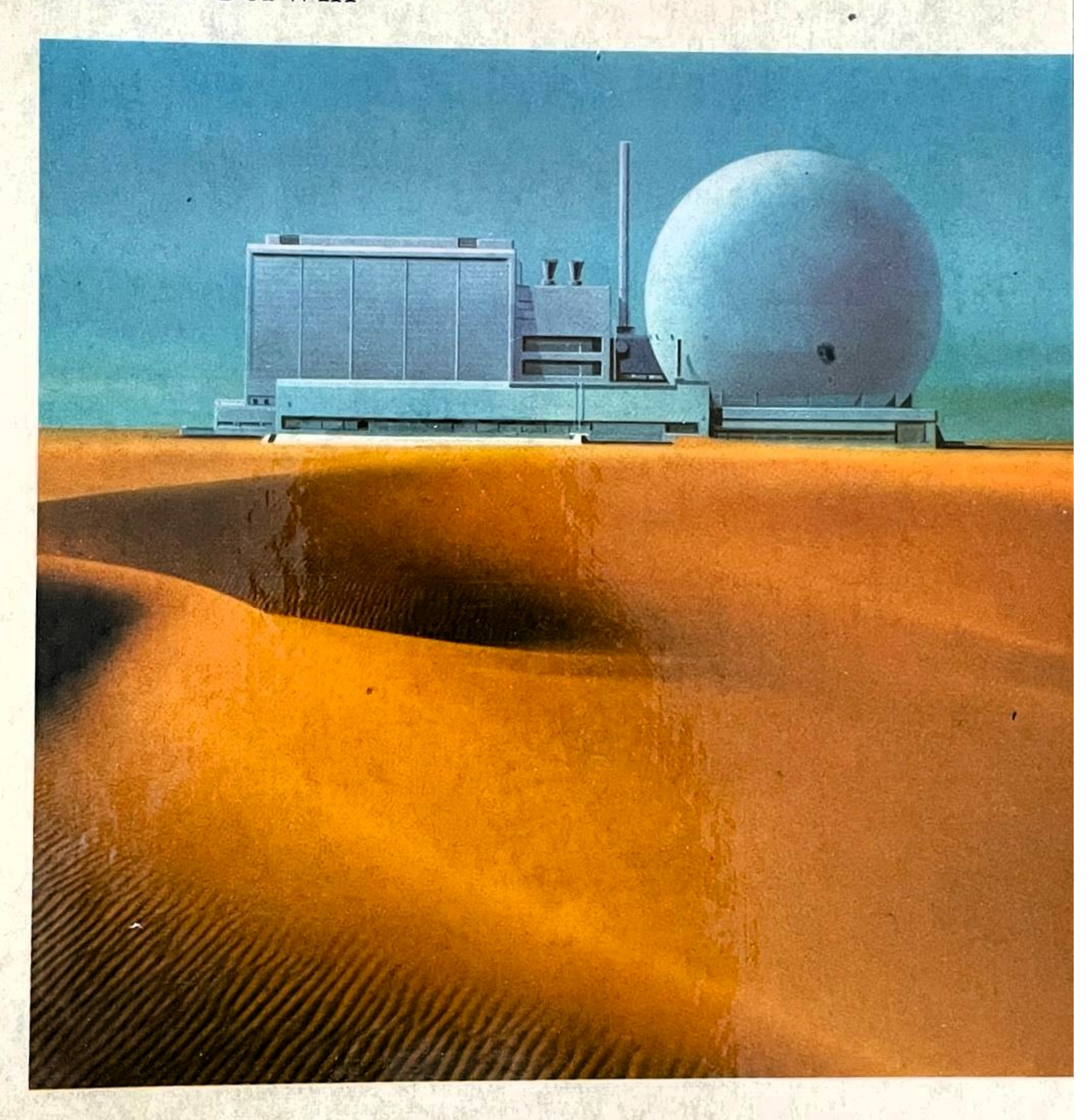
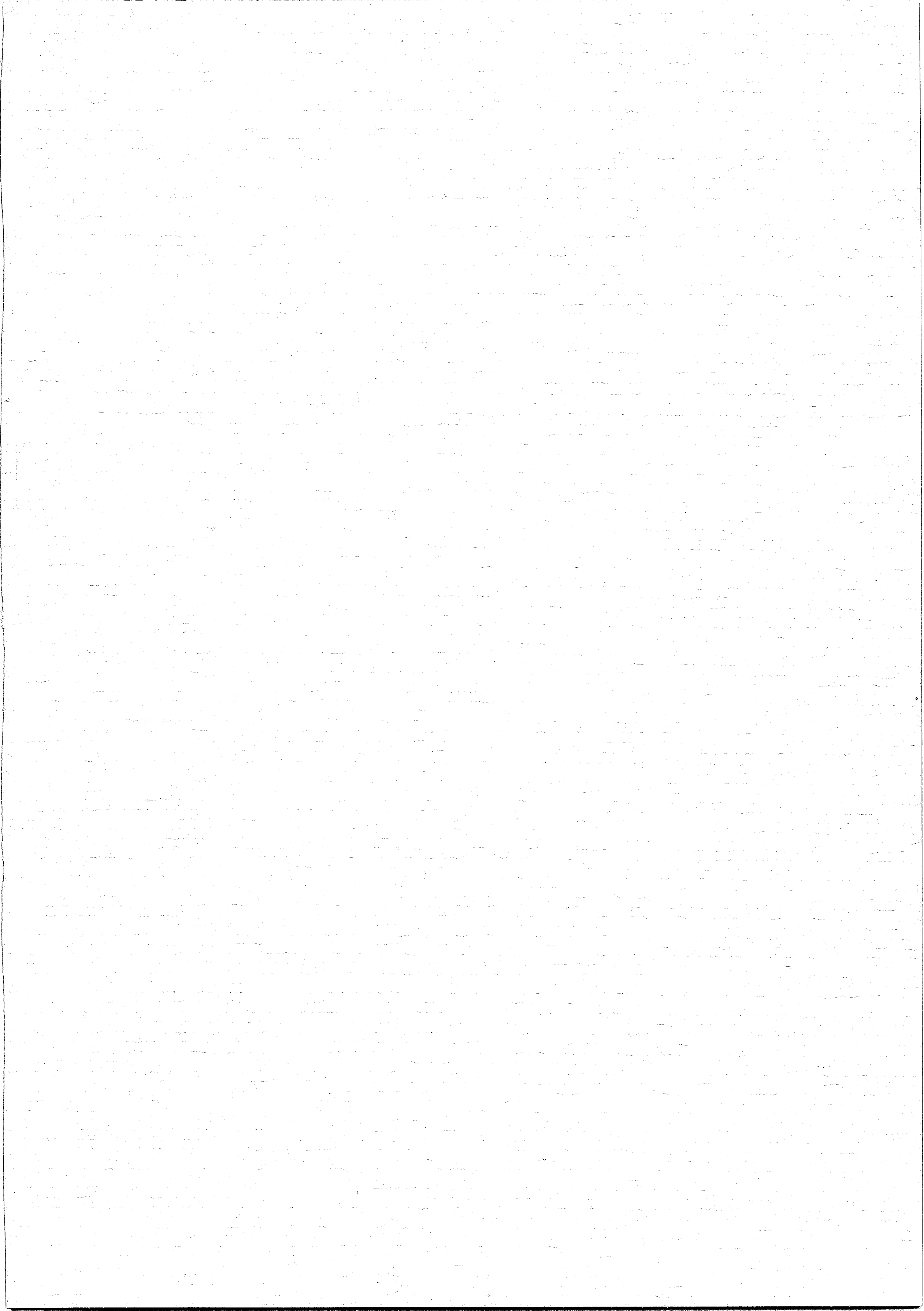
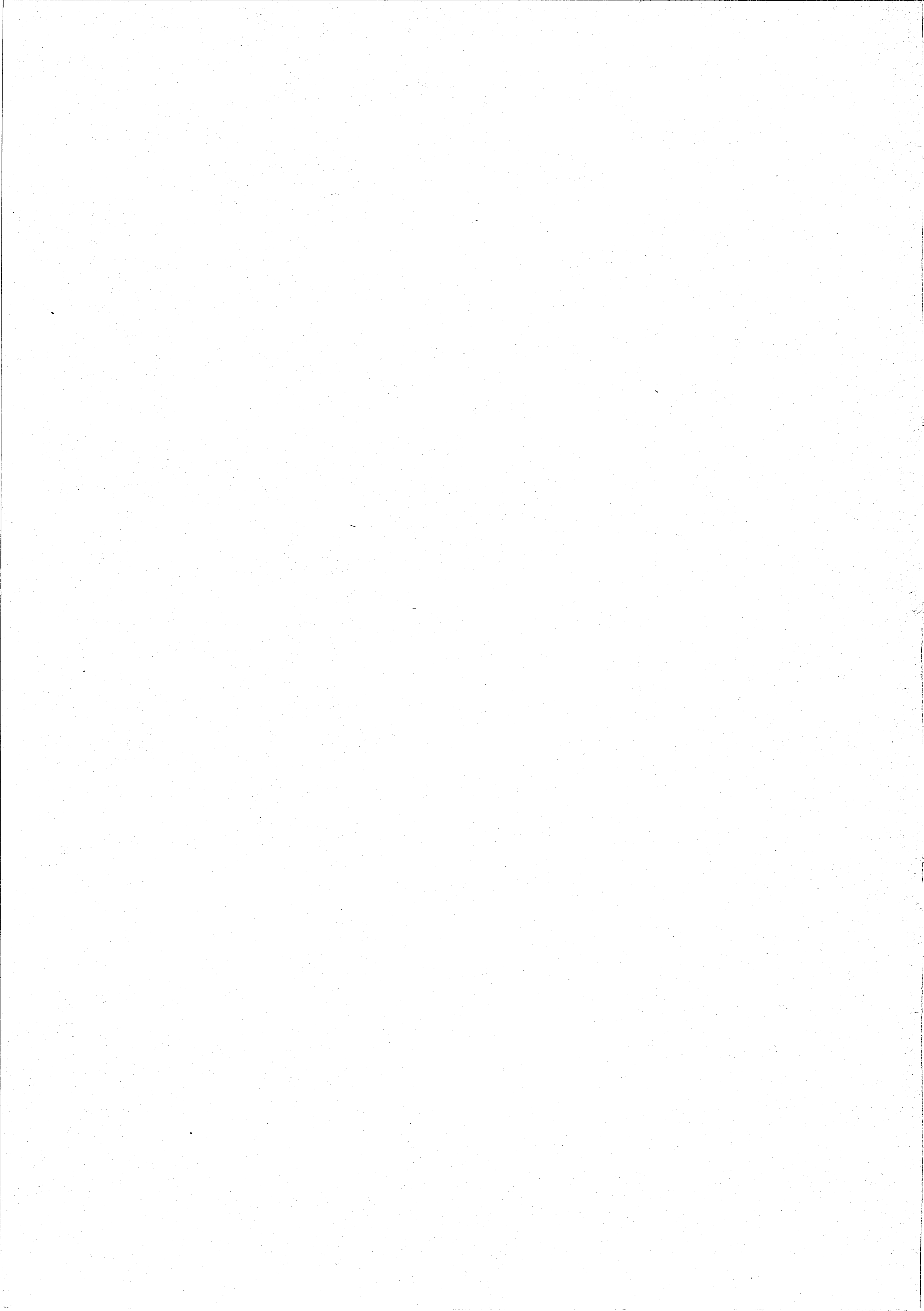
Kernkraft heute und morgen

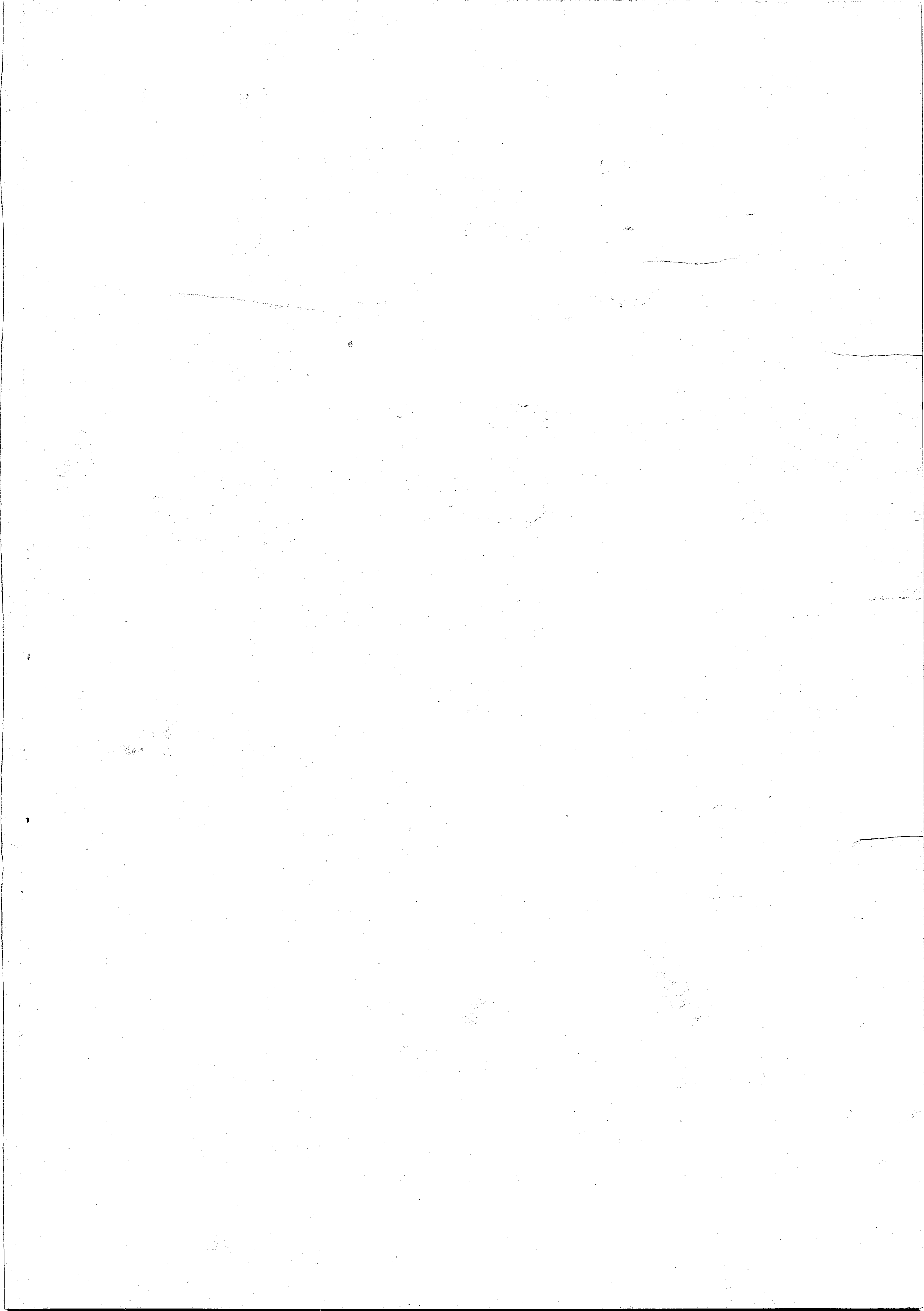
Robert Gerwin

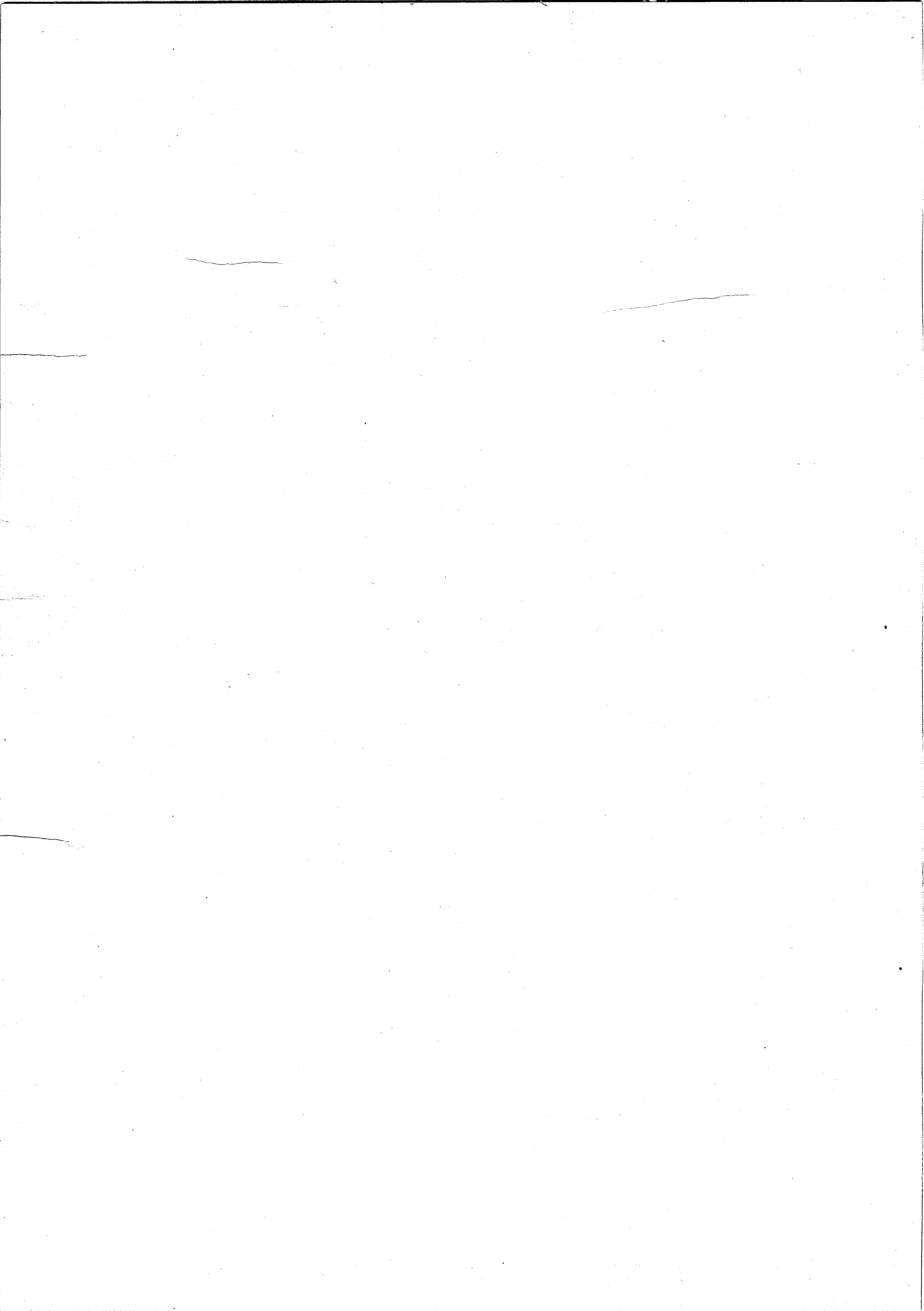


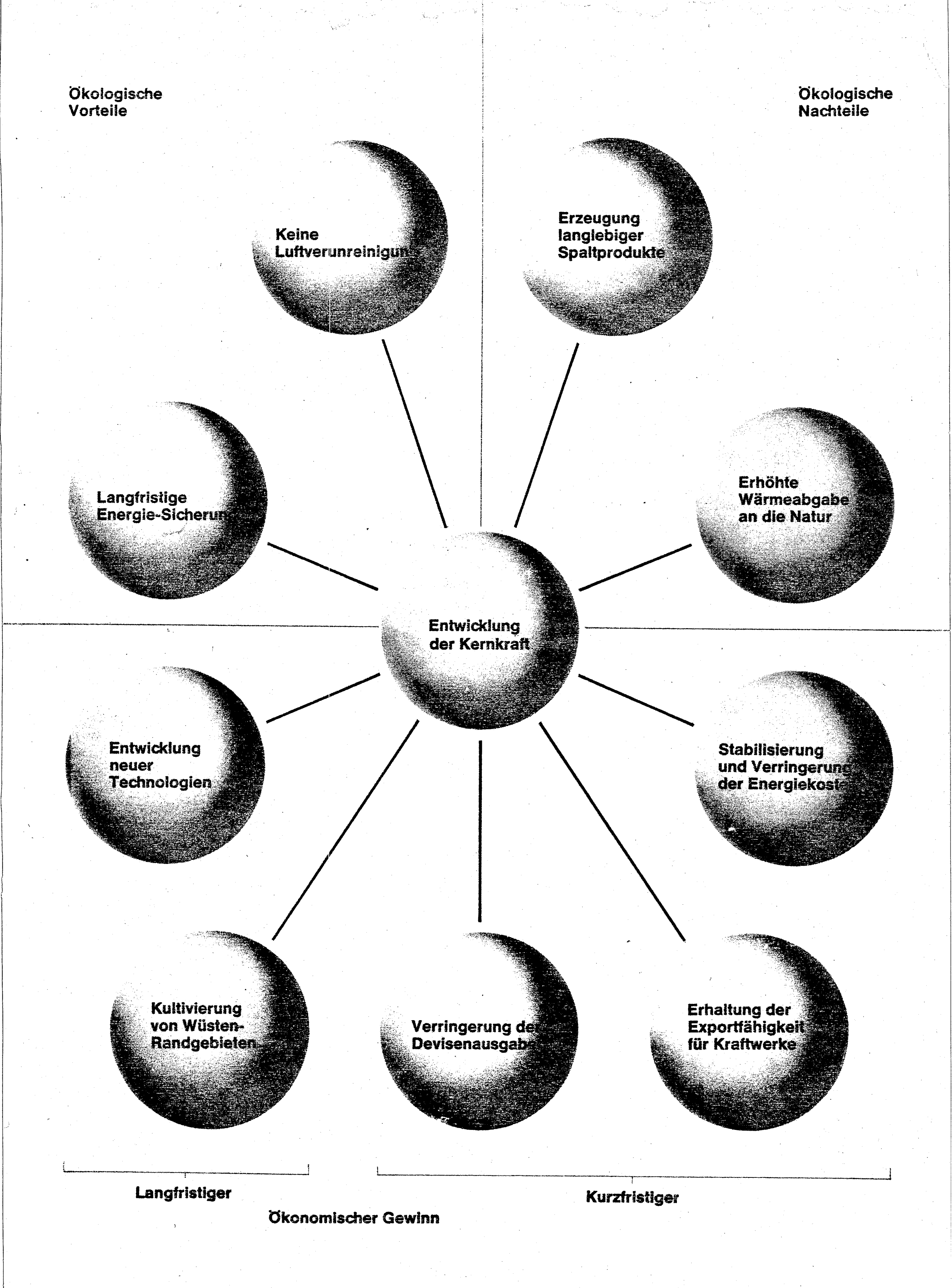
dva

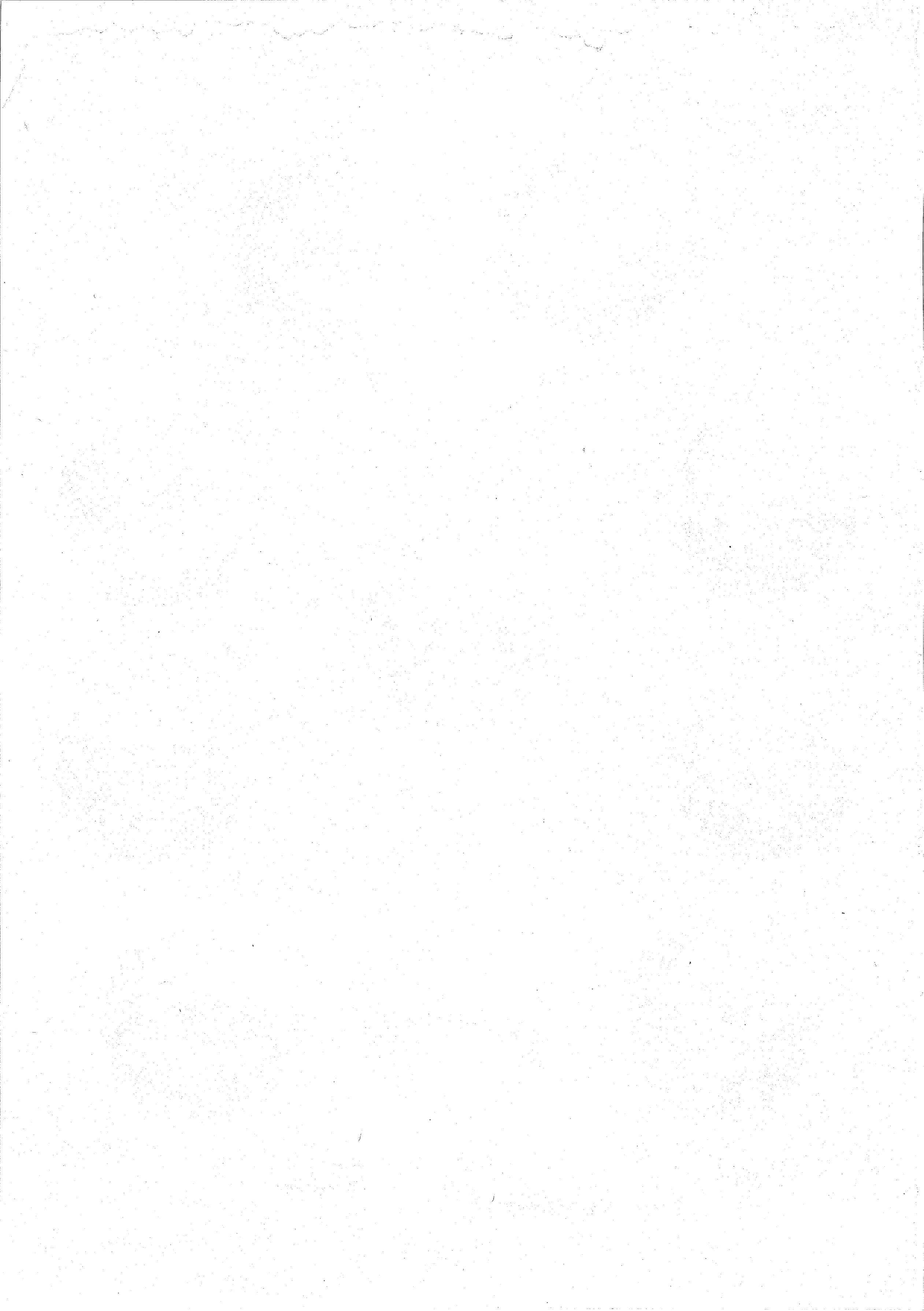




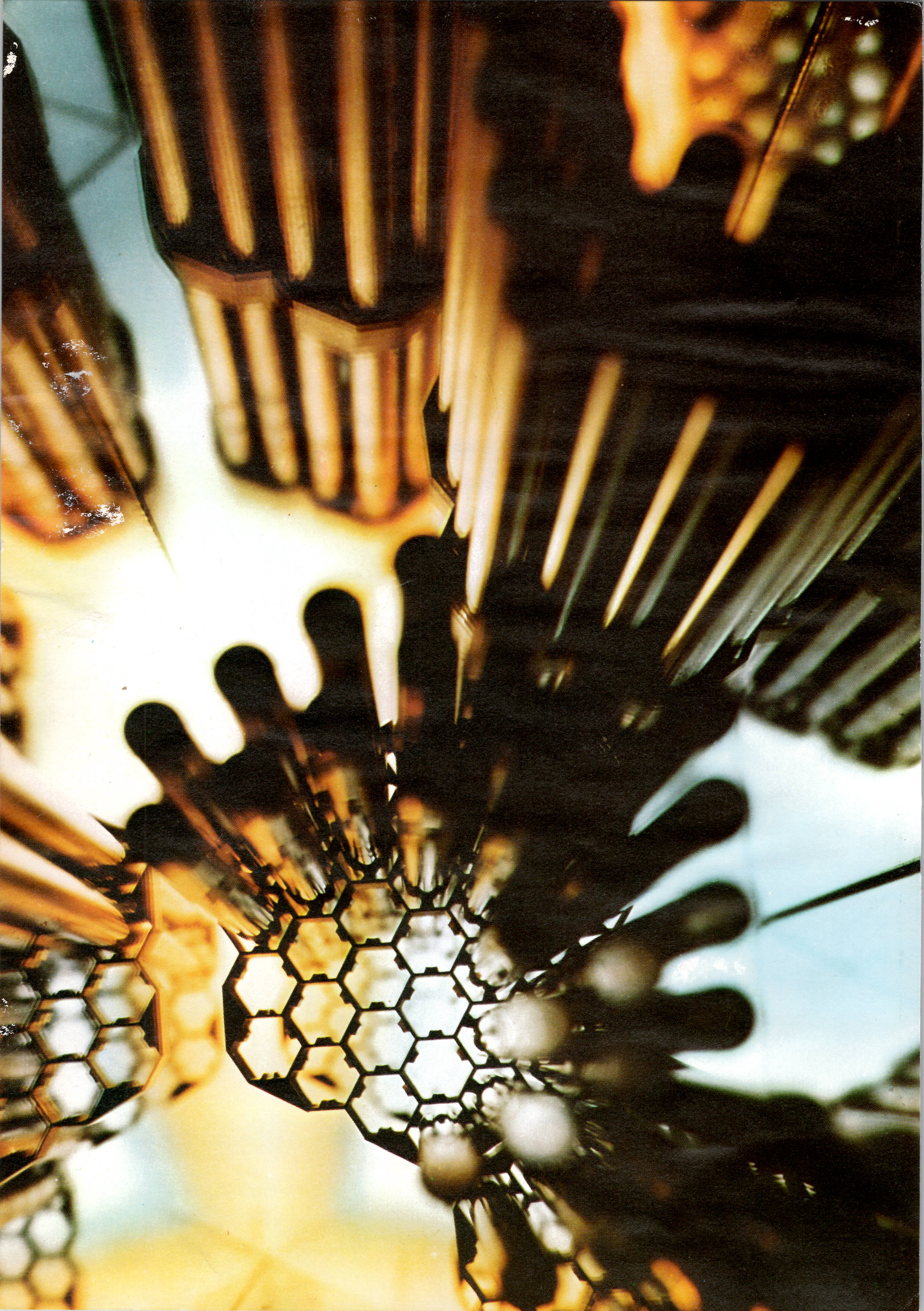





Ökologische
Vorteile
Ökologische
Nachteile
Keine
Luftverunreinigun
Erzeugung
langlebiger
Spaltprodukte
Langfristige
Energie-Sicherun
Erhöhte
Wärmeabgabe
an die Natur
Entwicklung
der Kernkraft
Entwicklung
neuer
Technologien
Stabilisierung
und Verringerung
der Energiekoste
Kultivierung
von Wüsten-
Randgebieten
Verringerung de
Devisenausgab
Erhaltung der
Exportfähigkeit
für Kraftwerke
Langfristiger
Kurzfristiger
Ökonomischer Gewinn



Robert Gerwin · Kernkraft heute und morgen



Robert Gerwin

Kernkraft heute und morgen

Kernforschung und Kerntechnik als Chance unserer Zeit

Deutsche Verlags-Anstalt
Stuttgart

Umschlagbild:
Ein Kernkraftwerk inmitten der Wüste muß heute keine Fata Morgana mehr sein. Noch in den siebziger Jahren wird dieses Bild Wirklichkeit werden, denn mit Hilfe der billigen Kernkraft können wir darangehen, in großem Stil Meerwasser zu entsalzen und Wüsten zu bewässern.

Umschlag-Innenseite (Vorsatz):
Die Kernkraft in ihrer ökologischen und ökonomischen Umgebung. Die relativ geringfügigen ökologischen Nachteile werden bei weitem durch die ökologischen und ökonomischen Vorteile aufgewogen.

Titelbild (Seite 2):
Blick in eine Brennelement-Versuchsanordnung für den natriumgekühlten Schnellbrüter-Prototyp SNR-300. Man erkennt ein Gitter, das die Brennstabbündel fixiert. Bei der hohen Leistungsdichte eines Brüterkerns ist es sehr wichtig, daß der Abstand zwischen den Brennelementen stets exakt eingehalten wird, ohne jedoch den Fluß des Kühlmittels zu stören.

ISBN 3 421 02262 3
Ein Buch der »Öffentlichen Wissenschaft« aus der Gruppe »Bild der Wissenschaft«

Gesamtherstellung: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH,
Grafischer Großbetrieb, Stuttgart
Printed in Germany

5678099714321

Inhalt

Bildquellen

Grafiken: Hellmut Ehrath / Werner Neidhardt

AEG-Telefunken: 8, 38, 39 links (nach AEG-Telefunken), 39 rechts, 60, 88, 89, 91 rechts oben, 97, 99 links. Nach Becker: 78 (Grafik). Brown Boveri/Krupp: 31 rechts unten, 49, 52, 53, 56, 115. K. Bürgle: Umschlag, 110/111 (nach National Laboratory Oak Ridge), 124/125. dpa: 12 (Bild 2 und 3), 123. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart: 12 (Bild 1). Deutsches Atomforum: 31 links oben. H. Ehrath: Nachsatz. Nach Euratom Bulletin 1965/3: 84, 85. Frewer: 16, 17. R. Gerwin: 94 (Grafik). Nach Vorlagen von R. Gerwin: Vorsatz, 58/59, 69, 76/77, 91. Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe: 29, 31 links Mitte, 78 (Foto), 81, 91 links unten. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Neuherberg: 82, 118. IAEA, Wien: 131. Interatom, Bensberg: 129. Kernforschungsanlage (KFA), Jülich: 42, 46, 57, 72, 94 (Foto), 120. Kraftwerk Union AG, Erlangen: 18, 20, 33, 34/35, 36 (Foto). Landesregierung NRW: 31 rechts Mitte. Nach Mandel: 12, 15. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching: 12 (Bild 5), 62, 65, 66/67, 68, 126. P. G. Neubarth: 31 rechts oben. Nukem: 91 rechts unten. F. Scherney: 119. Siemens AG: 2, 12 (Bild 4), 31 links unten, 91 links oben, 99 rechts, 106. Nach Siemens Reaktorentwicklung, Erlangen: 102, 103. United Nations: 109. K. Wirtz: 24.

Vorwort

Heute wie vor zwanzig Jahren geht von der Kernkraft eine besondere Faszination aus. War es früher die staunende Ehrfurcht vor der »Unterwelt« der Atome, so ist es heute das Bewußtsein, einer für unsere Zukunft wichtigen Entwicklung zu begegnen. Dieser Wandel wird deutlich markiert durch die IV. Genfer Konferenz für die friedliche Nutzung der Kernenergie. Ihr Motto lautet »Atoms for Development – Atome für die Entwicklung«.
So setzt dieses Buch nicht die Reihe der zahlreichen Atombücher fort, die um die Mitte der fünfziger und auch noch in den sechziger Jahren geschrieben wurden und das Ziel verfolgten, in die physikalischen und technischen Grundlagen der Kernforschung und Kerntechnik einzuführen. Dieses Buch kann vielmehr erstmalig berichten, was denn nun aus den Vorstellungen und Hoffnungen von damals geworden ist. Aber es kann auch die Schritte in die Zukunft jetzt konkret umreißen. Es behandelt weiterhin die über die reine Stromerzeugung hinausführenden anderen Nutzungsmöglichkeiten der Kernkraft, wie sie gerade für die Entwicklungsländer von großer Bedeutung sind.
So wagt es dieses Buch, sich gleichermaßen an den Fachmann wie an den interessierten Laien zu wenden. Seine detaillierte Gliederung und der umfangreiche Bildteil bieten dem Leser die Möglichkeit, sich gezielt diejenigen Informationen herauszusuchen, die ihn interessieren. Das Buch ist international orientiert in seiner Gesamtschau, in seinen Perspektiven für die Zukunft. Bei Einzelheiten schildert es jedoch vor allem die Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland. Es wird geschrieben aus Anlaß der im September 1971 in Genf stattfindenden IV. Atomkonferenz und dort als publizistischer Beitrag der Bundesrepublik vorgelegt. Es handelt sich hier jedoch nicht um ein offizielles Dokument, sondern um die Darstellung eines unabhängigen Fachschriftstellers. Er trägt die Verantwortung für die in diesem Bericht direkt oder indirekt ausgesprochenen Werturteile.

Robert Gerwin


KRB

Unsere Chance

Neue Energiequelle in einer veränderten Umwelt

Am Hof des Königs Mota Eigrene – so berichtet ein altes Märchen – erscheint eines Tages ein junger Mann mit einigen seltsamen Tieren einer Art, wie man sie hier noch nicht gesehen hat. In ihrer Statur ähneln diese Tiere den Eseln, die in diesem Land von alters her auf dem Feld, für das Tragen von Lasten und auch zum Reiten benutzt werden. Doch sie sind viel größer, kräftiger, schneller und leistungsfähiger. Wer einmal auf dem Rücken dieser ungewöhnlichen Tiere gesessen hat, ist hellauf begeistert. Dem König ergeht es nicht anders.
Doch er denkt weiter. Er kauft dem jungen Mann die Tiere ab, ruft den Hof zusammen und verkündet: »Es hat Allah gefallen, uns Hilfe für unsere harte tägliche Arbeit zu schicken. Von nun an sollen bei uns die Esel durch die Wundertiere – die man Pferde nennt – ersetzt werden. Wo ein Bauer bisher drei Tage benötigt hat, um seinen Acker zu bestellen, wird er das jetzt in einem Tag schaffen können. Und eine Reise, die bisher auf dem Rücken eines Esels einen ganzen Tag dauerte, wird man bald in wenigen Stunden machen. Ein neues besseres Zeitalter beginnt.«
Sofort wird des Königs Idee in die Tat umgesetzt. Überall im Land entstehen Pferdezuchten. Die Erträge der Felder wachsen, der Handel blüht auf, und ein angemessener Wohlstand breitet sich aus. Doch die Untertanen des Königs sind darüber keineswegs so begeistert, wie man es eigentlich erwarten sollte. Die neue Energiequelle – das Pferd – schafft auch neue Probleme. Es müssen größere Ställe

Seit 1966 ist an der oberen Donau bei Gundremmingen das erste große deutsche Kernkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 240000 Kilowatt (240 MW) in Betrieb. Diese Leistung reicht aus, um eine Großstadt von über 100000 Einwohnern mit elektrischem Strom zu versorgen. Bis zum Sommer 1971 hatte diese Anlage über ihre Hochspannungs-Schaltstation bereits über 6 Millionen Kilowattstunden in das mitteleuropäische Verbundnetz geschickt.

gebaut werden. Die Pferde verlangen besseres und reichlicheres Futter als die anspruchslosen Esel. Und vor allem stellt sich heraus, daß der Umgang mit Pferden nicht so ganz ungefährlich ist. Wer vom Rücken eines galoppierenden Pferdes stürzt, kann sich das Genick brechen. Den an das Eselfleisch gewöhnten Leuten schmeckt das Pferdefleisch nicht, und die feinen Leute am Hof des Königs kritisieren, daß die Pferde einen scharfen Geruch verbreiten. Man gründet sogar eine Art Volksbund zur Rettung der Natur – besser gesagt: des Esels.
Als der König dies alles hört, gerät er in äußerste Erregung. Er befiehlt seinen Soldaten, sofort alle Pferde fortzujagen. Die Untertanen sehen dem zunächst mehr belustigt als beängstigt zu. Doch schon bald müssen sie feststellen, wie sehr sie sich bereits an den mit den Pferden eingezogenen Wohlstand und Komfort gewöhnt hatten. Im darauffolgenden Jahr kommt es zu einer schweren Wirtschaftskrise, und schließlich bittet eine Bauernabordnung den König, seine Soldaten auszuschicken, um die fortgejagten Pferde wieder einzufangen. König Mota Eigrene gibt den Bitten der Bauern nach, doch die Soldaten kehren mit leeren Händen zurück. Die Pferde sind so verwildert, daß nicht eines lebend gefangen werden konnte.
Seither bitten die Priester in Eigrenes Königreich jeden Morgen Allah, er möge ihnen noch einmal eine Chance geben und einen Burschen mit gezüchteten Pferden schicken. Doch bisher hat Allah diese Bitte nicht erfüllt.

Gründe für die Kernkraft

Auch die ersten Atomkraftwerke wurden zunächst wie exotische Wesen einer anderen Welt bestaunt. Sich mit ihrer Entwicklung zu befassen, erschien als reizvoller Beitrag zum technischen Fortschritt, doch keinesfalls als echte Notwendigkeit. Es war gelungen, die geheimnisumwitterte Kernkraft nun auch für friedliche Zwecke in den Griff zu bekommen. Das Bewußtsein dieses Sieges genügte den Menschen zunächst. Noch durfte die Kernkraft wie ein junges Fohlen neben dem Wagen der industriellen Entwicklung herlaufen, noch war es nicht vor diesen Wagen gespannt. Doch dann kam es in den letzten Jahren zu einer Wandlung, bei der die Kernkraft in ihre wirkliche Rolle hineingewachsen ist. Heute sieht man in ihr *die* große grundlegende Energiequelle der Zukunft und hat dafür eine ganze Reihe gewichtiger Gründe.
Der eine Grund ist einfach der, daß der ständig steigende elektrische Strombedarf überall in geradezu schwindelerregendem Umfang den Neubau von Kraftwerken verlangt. Die neu zu schaffenden Kraftwerkskapazitäten lassen sich aber technisch und wirtschaftlich sinnvoll nur in der Form sehr großer Kraftwerksblöcke bauen. Und gerade für große Leistungseinheiten ist die Kernenergie ideal. Gerade dort bietet sie besondere wirtschaftliche Vorteile.

Überhaupt verspricht die Kernenergie eine Stabilisierung der Strompreise und eine wesentliche Erhöhung der Versorgungssicherheit. Der Anteil der Brennstoffkosten am Stromerzeugungspreis ist nämlich bei Kernkraftwerken sehr gering. Er beträgt nur etwa ein Viertel der Gesamtkosten. Bei Ölkraftwerken sind es etwa zwei Drittel. Bei den künftigen Brüter-Kernkraftwerken kann man die Uranerzkosten sogar fast vergessen, so klein werden sie sein. Ein Anstieg der Uranpreise kann sich also niemals so auf die Stromerzeugungspreise auswirken, wie das bei einer Steigerung der Ölpreise oder Kohlepreise unausweichlich ist. Zum anderen ist die Energiekonzentration im Uran, selbst wenn dieses im Reaktor nur zum kleinen Teil gespalten wird, mehr als hunderttausendmal größer als in Kohle oder Öl. Schon ein kleiner, wenig Raum beanspruchender Uranvorrat reicht aus, den Betrieb eines großen Kernkraftwerks für mehrere Jahre zu sichern. Man kann also mit sehr wenig Lagerraum für große Krisensituationen vorsorgen.

Und nicht nur Strom kann man mit Kernenergie erzeugen. Wenn sie in Hochtemperatur-Reaktoren freigesetzt wird, eignet sie sich auch für chemische Prozesse. Weiterhin verspricht sie eine wirtschaftlich tragbare Wasserentsalzung. Das kann für Länder mit ausgedehnten Trockengebieten am Rande der Ozeane von entscheidender Bedeutung werden. Kernkraftwerke werden einmal im Zentrum von Industrie- und Agrarkomplexen am Rande der großen Wüsten stehen.

Für die hochtechnisierten Länder ist wichtig, daß Kernkraftwerke besonders umweltfreundlich sind. Zwar geben sie heute noch in geringem Umfang Radioaktivität an die Umgebung ab, und in den Kernkraftwerken der heutigen Generation fällt auch je erzeugter Kilowattstunde etwas mehr Abfallwärme als in entsprechenden Öl- und Kohlekraftwerken an, so daß die Flüsse etwas stärker thermisch belastet werden. Doch wie geringfügig sind diese Nebenwirkungen, vergleicht man sie mit der Belastung durch die giftigen Verbrennungsgase, die vor allem Ölkraftwerke in die Luft blasen. Mit Recht verweisen die Betreiber von Öl- und Kohlekraftwerken auf die wesentlich schlimmere Luftverschmutzung durch das Auto, die Hausfeuerstellen und bestimmte Chemiewerke. Doch bei ungünstigen Wetterlagen können auch die Verbrennungsgase von Kraftwerken erheblich zur Bildung des erwiesenermaßen gesundheitsschädlichen Smog beitragen.

Schließlich ist die Kerntechnik mit ihren hohen Anforderungen an Werkstoffe und Zuverlässigkeit ein Pionier des technischen Fortschritts schlechthin. Die planvolle Nutzung der Radioaktivität kann in der Landwirtschaft – um nur ein Beispiel von vielen herauszugreifen – zu einer entscheidenden Steigerung der Erträge führen. – Werden alle diese Chancen heute richtig gesehen? Sind wir uns der Bedeutung der Kernkraft wirklich bewußt?

Immer noch begegnet man der Kernkraft mit gewisser Skepsis und einigem Unbehagen. Was zu ihrer Verteidigung angeführt wird, entspricht oft nicht ihrem wirklichen Rang. Man mäkelt in kleinlicher Weise an Details der kerntechnischen

Jahr	Ära	Hauptenergiequellen	Energiepotential der einzelnen Primärenergiequellen
	Regenerative Energiequellen	Muskelkraft Holz max. Anteil um 1800	Jährliche nutzungsfähige regenerative Energiequel $0{,}06 \times 10^{18}$ kcal/a davon Holz $0{,}03 \times 10^{18}$ kcal
1870	Fossile Brennstoffe	Kohle max. Anteil um 1910 Erdöl und Erdgas max. Anteil um 1980	Nutzungsfähige Gesamtvorkommen fossiler Brennstoffe 28×10^{18} kcal davon Kohle 23×10^{18} kcal davon Erdöl $1{,}1 \times 10^{18}$ kcal davon Erdgas $1{,}2 \times 10^{18}$ kca
2000	Kernenergie	Kernspaltung Kernfusion	Nutzungsfähige Uranvorkommen $1{,}5 \times 10^{21}$ kcal D-D Reaktionen 9×10^{24} kcal Lithium-Reaktionen (gleiche Größenordnung)

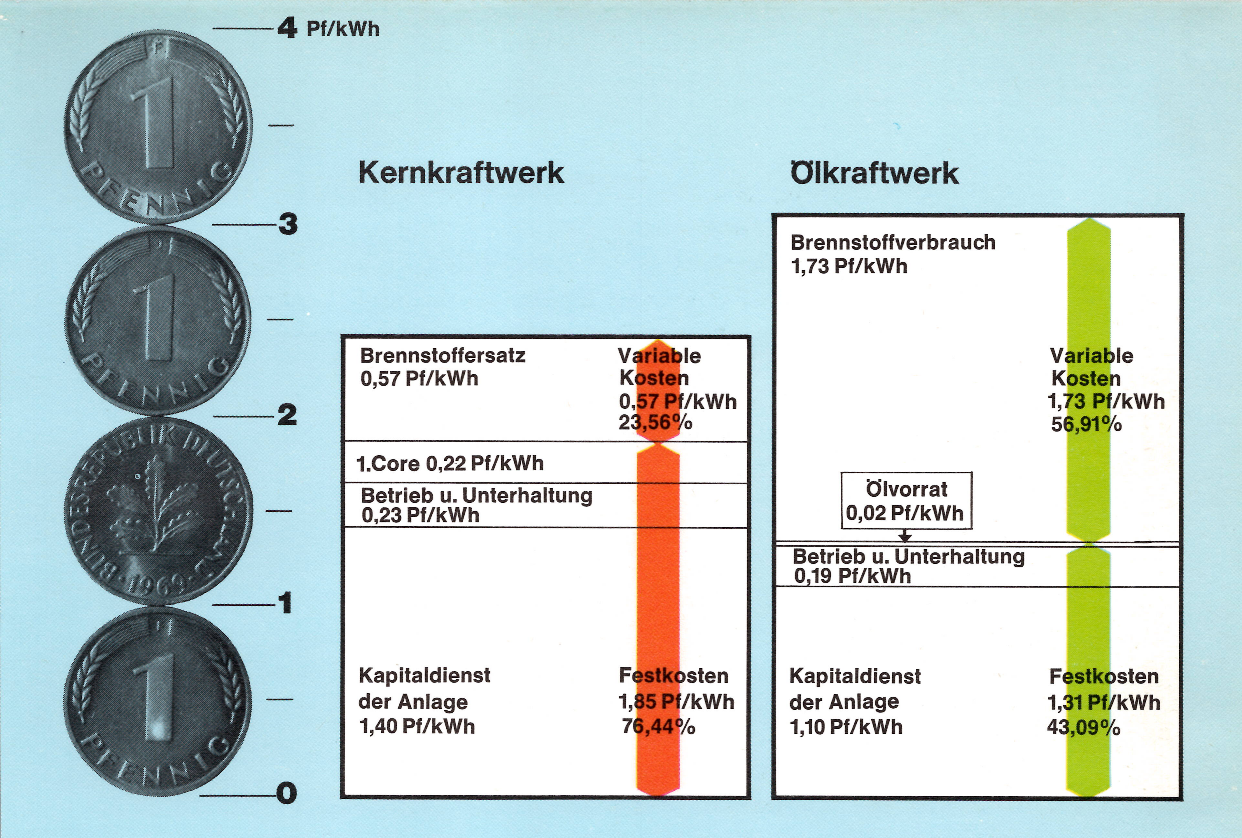
Entwicklung herum und versperrt sich so den Blick auf die weitreichenden Zukunftschancen. Man stuft die Kernkraft noch in Bereiche der Forschung ein, wo es notwendig wäre, ihre volkswirtschaftlichen Konsequenzen in vollem Umfang zu sehen. Die physikalischen Grundlagen der Kernkraft sind zwar heute jedem gebildeten Laien hinreichend geläufig, doch er traut sich oft nicht, von diesem Wissen auch Gebrauch zu machen und bei der Diskussion über technische Fragen selbständig mitzudenken. Zu sehr wird immer noch die kleine Schar der sogenannten Atomexperten bestaunt.
So beschleicht den zeitkritischen Beobachter mitunter die Furcht, die mit der neuen Energiequelle gebotenen Chancen könnten sich – wie in dem eingangs geschilderten Märchen – plötzlich wieder verflüchtigen. Es könnten sich aus falschen Vorstellungen im Bewußtsein der Öffentlichkeit Fehlentscheidungen entwickeln, durch die die Kernkraft – zumindest regional – »in die Wüste gejagt« würde. Das würde ihre Entwicklung – auf lange Sicht und global betrachtet – sicher wenig beeinflussen, doch in dem davon betroffenen Land könnten die Konsequenzen schwerwiegend sein. Die Chance, eine neue Energiequelle erschließen zu können, wird einem nicht so oft geboten, und hat man sie erst einmal vertan, ist sie nicht so leicht zurückzugewinnen. – Vielleicht mag uns das die Entdeckung des Pferdes im Reich von König Mota Eigrene lehren. Sein Name ist übrigens ein bezeichnendes Anagramm.

Durchbruch zur Wirtschaftlichkeit

Nach der ersten berühmten Konferenz der Vereinten Nationen für die Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwecken – durchgeführt im August 1955 – stand die Entwicklung der Kernkraft ganz unter der Idee des Durchbruchs zur Wirtschaftlichkeit. Mit der Konferenz fielen bei den Atomgroßmächten alle bis dahin bestehenden militärischen Geheimhaltungsklauseln, soweit es nicht um die Kernfusion, sondern um die Kernspaltung und den Bau von Kernspaltungsreaktoren

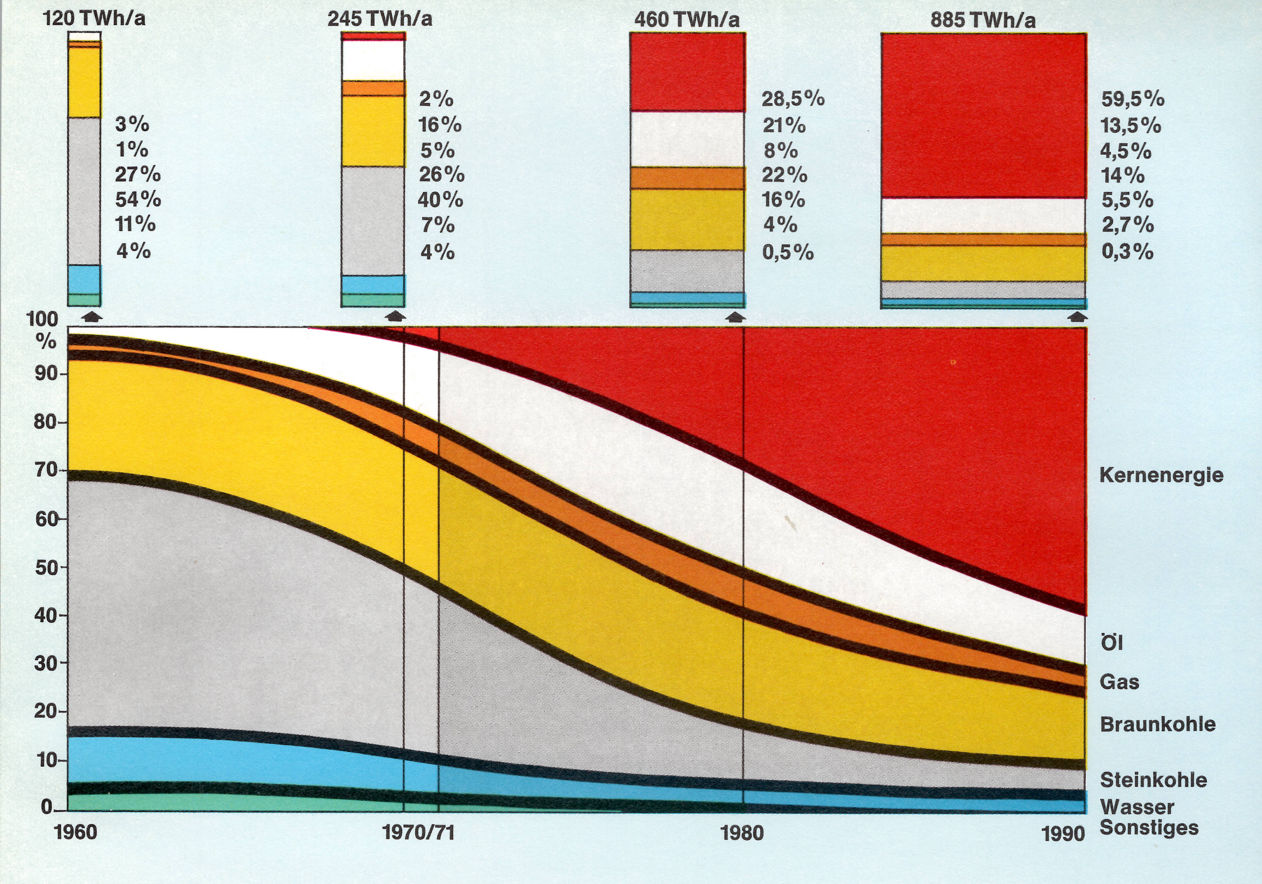
Geschichte der Energienutzung in der Vergangenheit und absehbaren Zukunft (nach Mandel). Bis etwa 1870 hat sich die Menschheit im wesentlichen auf die Nutzung von Primärenergiequellen beschränkt, die von der Natur laufend regeneriert werden. Das sind Wasserkraft und Holz. Wir nutzen zur Zeit vor allem die nichtregenerativen fossilen Brennstoffe, wobei seit 1960 ein deutlicher Umbruch zur Nutzung flüssiger und gasförmiger Brennstoffe festzustellen ist. Spätestens vom Jahr 2000 ab wird das Schwergewicht unserer Energieversorgung bei der Kernkraft liegen.

ging. Die vom amerikanischen Präsidenten Eisenhower verkündete Parole »Atoms for Peace – Atome für den Frieden« sprang auch auf andere technisch fortschrittliche Länder über und führte zu einer weltweiten Forschungs- und Entwicklungsaktivität. Es begann eine Art Wettlauf um das wirtschaftliche Kernkraftwerk, um Kernenergieanlagen mit Stromerzeugungskosten, die bei normaler privatwirtschaftlicher Kalkulation unter den Stromerzeugungskosten herkömmlicher Kraftwerke liegen sollten. Erst wenn das erreicht war – das lag auf der Hand –, konnte man von einem Sieg der Kernkraft sprechen.
Nun, wie es bei solchen Entwicklungen ist, dem großen Enthusiasmus folgten Phasen der Enttäuschung und Resignation. So schnell ließ sich die Natur nicht überlisten, so einfach war die Sache nicht. In Großbritannien und Frankreich – Länder mit staatlicher Stromversorgungsbehörde und mächtiger Atomenergiebehörde – wurde der Durchbruch zur Wirtschaftlichkeit schon früh verkündet, schon gegen Ende der fünfziger Jahre. Die gasgekühlten Natururan-Reaktoren, die hier die Basis für den Durchbruch bildeten, vermochten jedoch in anderen Ländern nicht zu überzeugen. Dort dauerte es bis in die Mitte der sechziger Jahre, daß die privaten Stromversorgungsunternehmen Kernkraftwerke aus eigener Initiative – weil sie ihnen den billigsten Kilowattstundenpreis versprachen – bestellten. Die Basis dieses Erfolgs waren der Siedewasser- und der Druckwasser-Reaktor. Beide liegen seither als etwa gleichwertig im Rennen.
Der Durchbruch der Kernenergie zur Wirtschaftlichkeit, von dem man in Mitteleuropa seit 1967 sprechen kann – seit der Bestellung der Kernkraftwerke Würgassen (Weser) und Stade (Elbe) –, hat sich jedoch bisher keineswegs als der große Schritt ins Paradies erwiesen. Weiterhin muß harte Entwicklungsarbeit geleistet werden, um durch Vergrößerung der Kraftwerksblöcke die durch steigende Lohnkosten verursachten Baukostenanstiege aufzufangen, um wachsenden Sicherheitsforderungen gerecht zu werden und die gerade bei großen Einheiten so notwendige Betriebssicherheit zu erreichen. Die europäischen Kernkraftwerkshersteller, die ihre Kraftwerke in den sechziger Jahren zu Festpreisen angeboten haben, müssen vorerst noch erhebliche finanzielle Verluste schlucken, sie stecken weiterhin tief in den roten Zahlen. Selbst in den USA ist die Kernindustrie trotz aller Staatshilfe bestenfalls aus der Verlustzone heraus. Bei einer im Frühjahr 1971 in Bonn durchgeführten Reaktortagung wurde offiziell erklärt, der Durchbruch der Kernenergie habe noch nicht das goldene Zeitalter beschert, in dem die Hauptanstrengungen vorbei seien und man nur noch einfach zu bauen brauche, um zu verdienen. Vielmehr habe man es auch hier mit einem permanenten Lern- und Anstrengungsprozeß zu tun. Unsere Zeit sei zu schnellebig, als daß man sich mit einem einmal erreichten Stand zufriedengeben könne.
Trotzdem ist es im Frühjahr 1971 – ungeachtet der Kostensteigerungen und Terminverzögerungen – beim Bau von Kernkraftwerken in Mitteleuropa zu einer



Kostenstruktur für die Erzeugung einer Kilowattstunde in einem Ölkraftwerk und einem Kernkraftwerk, berechnet für eine Kraftwerksleistung von je 600 MW und bei einer Ausnutzung des Kraftwerks von 6000 Stunden pro Jahr für den Anfang der siebziger Jahre. Beim Kernkraftwerk entsteht der weitaus größte Kostenanteil durch die Amortisation der Baukosten und Kernbrennstoff-Erstausstattung. Der Kostenanteil für den Brennstoffverbrauch ist gering. Beim Ölkraftwerk wirkt sich eine Erhöhung der Brennstoffpreise viel stärker aus.

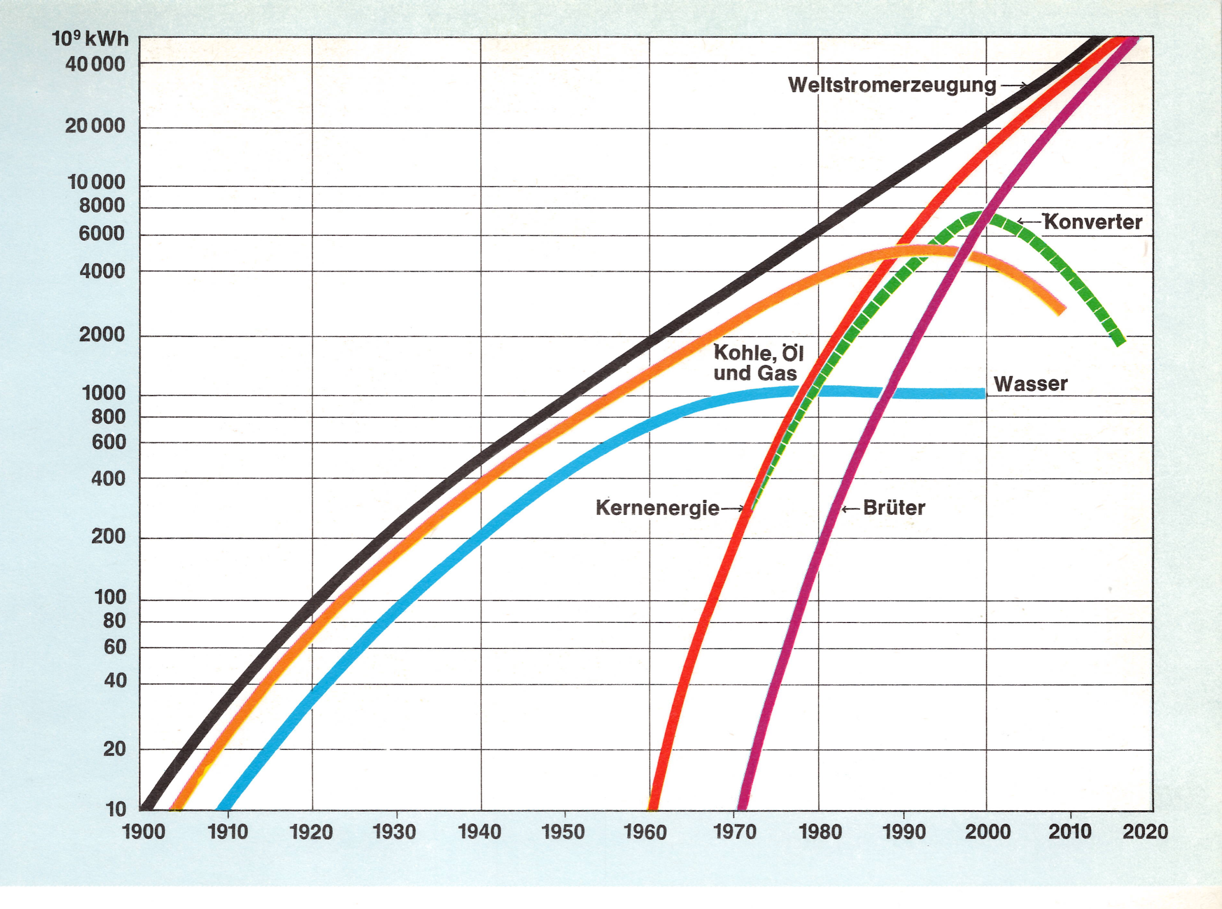
regelrechten Lawine neuer Kernkraftwerks-Bestellungen gekommen. Sie wird dazu führen, daß bereits 1976 in der Bundesrepublik Deutschland 15 Prozent der Stromerzeugung durch Kernkraftwerke erfolgen und bis 1980 der nukleare Anteil der Stromerzeugung auf 25 Prozent geklettert sein wird. Andererseits sind die Wasserreaktoren, mit denen dieser Durchbruch vollzogen wird, ökonomisch wie technisch noch nicht der Weisheit letzter Schluß. Ihr Entwicklungspotential ist begrenzt. Will man auch für die fernere Zukunft sichergehen, muß man weitere Reaktorentwicklungen im Auge behalten und aktiv weitertreiben, nämlich die Entwicklung des Hochtemperatur-Reaktors und des Schnellen Brüters. Sobald es einmal physikalisch und technisch möglich erscheint, einen Fusionsreaktor in Gang



Voraussichtliche Entwicklung des Strombedarfs der Bundesrepublik bis zum Jahr 1990 (nach Frewer). Bei einer mittleren Steigerungsrate von 7 Prozent pro Jahr wird der Strombedarf von gegenwärtig 245 Milliarden Kilowattstunden (TWh) auf 885 TWh steigen, wie das die Säulen im oberen Teil der Graphik andeuten. Dementsprechend müssen zu der heute in der BRD verfügbaren Kraftwerksleistung von 50000 MW bis 1990 einschließlich Ersatz alter Kraftwerke noch einmal 150000 MW dazugebaut werden, also das Dreifache der heute vorhandenen

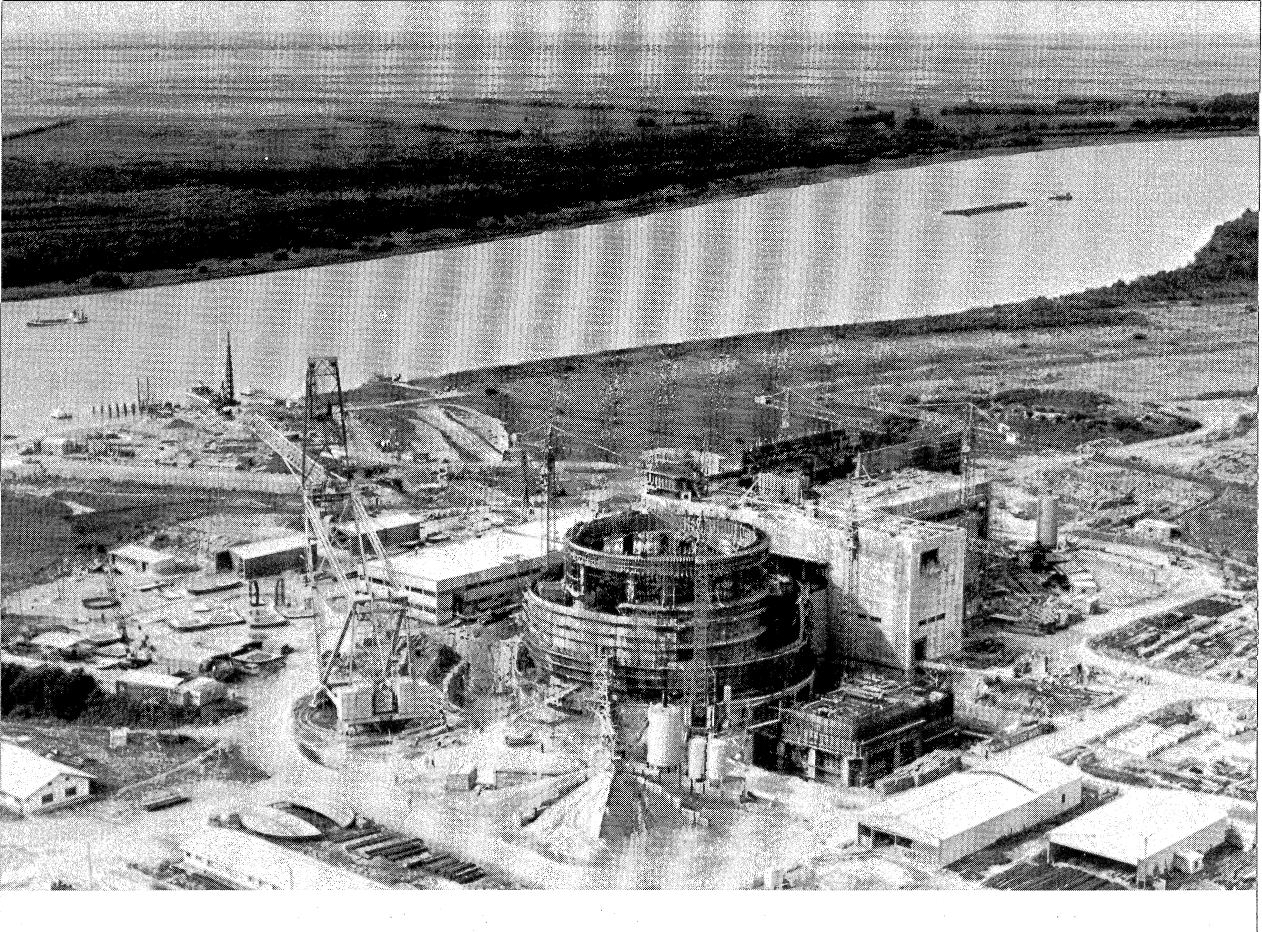
zu setzen, wird man auch an die Entwicklung von Fusionskernkraftwerken denken müssen. Erst dadurch wird man die Chancen, die in der Kernkraft stecken, wirklich voll ausnutzen.

Andererseits sind die Kernkraftwerke als solche nur so etwas wie die Spitze eines Eisbergs einer breiteren Technik, deren größerer Teil unsichtbar bleibt und etwas vage als Brennstoffkreislauf bezeichnet wird. Bei einem Ölkraftwerk endet die Verarbeitung des Brennstoffs mit der unkontrollierten Entlassung der giftigen Verbrennungsgase in die Atmosphäre. Bei einem Kernkraftwerk muß jedoch der im Kraftwerk immer nur teilweise verbrauchte Kernbrennstoff aufgearbeitet



Leistung. Die Verschiebung des prozentualen Anteils zeigt der untere Teil der linken Graphik. Die Steinkohle, die 1960 noch über 50 Prozent des Strombedarfs deckte, wird 1990 nur noch knapp 10 Prozent beitragen. Statt dessen wird der Anteil der Kernenergie auf über 50 Prozent gestiegen sein. – Rechts in einer anderen Darstellungsweise der Anteil der einzelnen Energieträger an der Weltstromerzeugung für unser Jahrhundert.

werden, und die Fixierung der anfallenden »Asche« – der radioaktiven Spaltprodukte – ist ein ökonomisch wie sicherheitstechnisch gleichermaßen wichtiger Faktor. Am Anfang dieses Kreislaufs steht man vor der Notwendigkeit, den spaltbaren Urananteil künstlich anzureichern, und es ist eine sehr gewichtige volkswirtschaftliche und politische Entscheidung, wieweit man dazu eigene Anreicherungsanlagen bauen will oder sich auf die Dienstleistung der amerikanischen – und neuerdings sowjetischen – Anlagen verläßt. Sie bedeuten eine gewaltige Investition, die überflüssig werden kann, sobald den künftigen Brüter-Kernkraftwerken der Durchbruch zur Wirtschaftlichkeit gelingt.



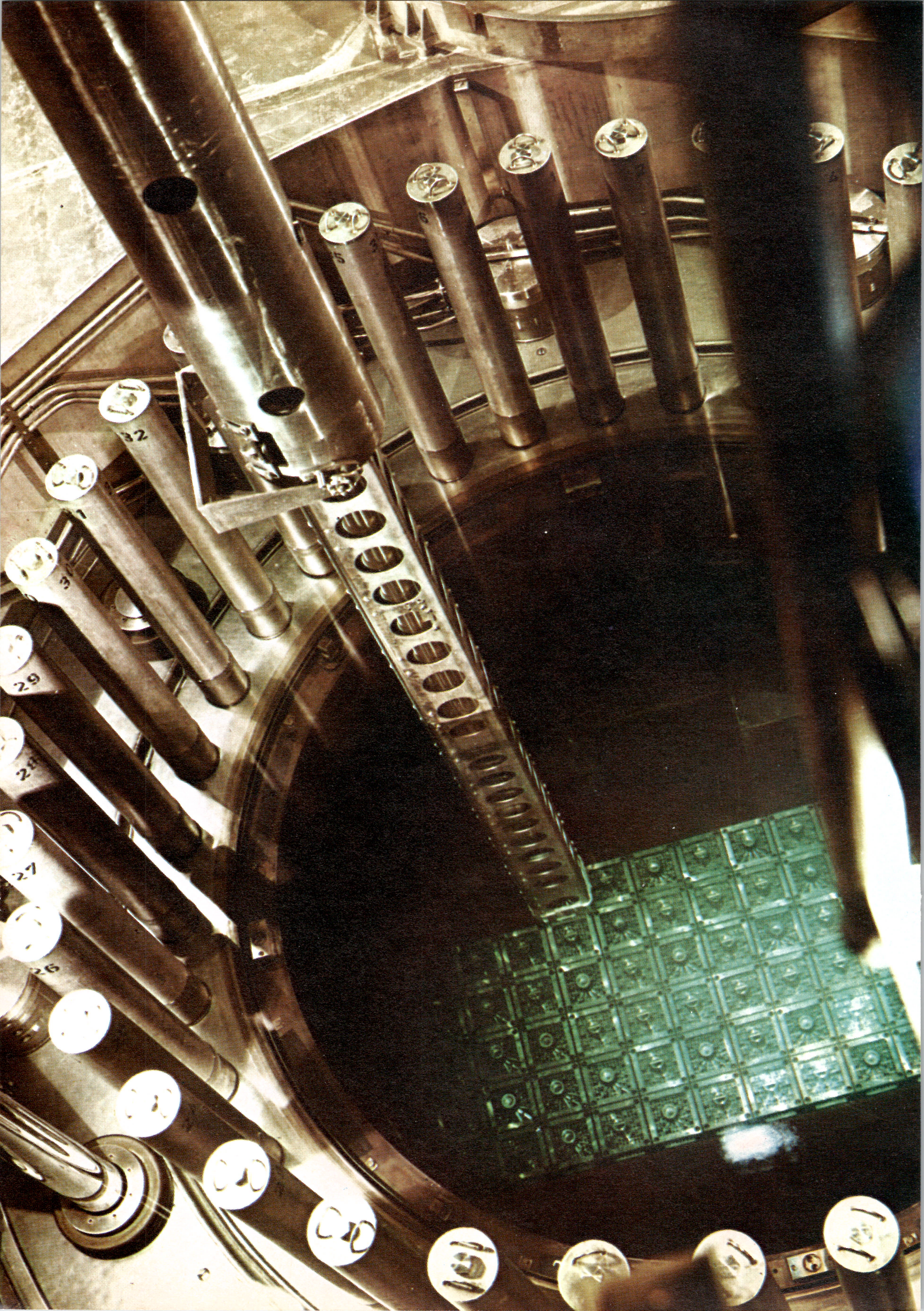
Als erste Kernenergieanlage Südamerikas entsteht hier am Westufer des Rio Paraná, etwa 100 km nördlich von Buenos Aires, das Kernkraftwerk Atucha. Argentinien entschied sich für einen Schwerwasser-Reaktor deutscher Konstruktion, um in seiner Kernbrennstoff-Versorgung unabhängig zu sein. Der deutsche Exportauftrag ist begleitet von einem Regierungsabkommen zur wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen den deutschen Kernforschungszentren und der argentinischen Atomenergiekommission.

So ist die Entwicklung der Kernkraft eng mit politischen und volkswirtschaftlichen Überlegungen verknüpft. Und trotz des erwiesenen Durchbruchs zur Wirtschaftlichkeit kann diese Entwicklung noch nicht ganz aus der Obhut des Staates entlassen werden. Es müssen weiterhin Steuergelder für die Weiterentwicklung des Brennstoffkreislaufs und für die Entwicklung von Kernkraftwerken der nächsten Generationen zur Verfügung stehen. Damit stehen plötzlich Politiker vor der Entscheidung, ob die Entwicklung eines bestimmten Kernkraftwerktyps sinnvoll ist oder nicht. Sie müssen verantworten, ob die für den Bau einer Anreicherungsanlage vorgesehenen Millionen nicht besser an anderer Stelle investiert werden sollten.

In der Bundesrepublik Deutschland war die Entwicklung der Kerntechnik von Anfang an ein rein ziviltechnologisches Unternehmen, das sich nicht auf Vorleistungen im militärischen Bereich stützen konnte. Das wurde in der Vergangenheit gelegentlich bedauert, hat sich jedoch eindeutig als Segen entpuppt. Von Anfang an entwickelte sich eine fruchtbare Partnerschaft zwischen Staat, Forschung und Industrie, bei der die private Initiative großen Spielraum hatte. Nur dank dieser günstigen Voraussetzungen konnte die Bundesrepublik so schnell eine führende Position auf dem internationalen Kernkraftmarkt erlangen.

Forderungen der Gesellschaft

Heute muß die Entwicklung der Kernkraft mehr noch als bisher unter gesellschaftspolitischen Gesichtspunkten gesehen werden. Die Zeiten blinder Fortschrittsgläubigkeit sind vorbei. Die Gesellschaft will selbst die Prioritäten bestimmen, nach denen sich der Fortschritt künftig entwickeln soll. Der nationale Ehrgeiz, der bis vor kurzem noch ein wichtiges Motiv für die Beschäftigung mit avantgardistischen technischen und wissenschaftlichen Entwicklungen war – es sei hier nur an die Diskussion über die technologische Lücke erinnert –, tritt mehr und mehr in den Hintergrund. Es erscheint heute wichtiger, daß der technische Fortschritt nicht wild wuchert, sondern sinnvoll gesteuert verläuft. Er soll helfen, das soziale Gefälle in der Welt einzuebnen. Er darf nicht nur den reichen Ländern dienen, sondern er muß vor allem auch den armen Ländern helfen. Natürlich birgt die Berücksichtigung gesellschaftspolitischer Relevanz – wie das dazugehörige Schlagwort lautet – auch Gefahren in sich. Sie entstehen bei der praktischen Durchführung. Wer kann wirklich beurteilen, was für die Gesellschaft wichtig ist, und besitzt zugleich genug Sachkenntnis und Phantasie, um die Chancen der zu beurteilenden technisch-wissenschaftlichen Möglichkeiten richtig vorauszusehen? Allein mit den gesellschaftspolitischen Vorstellungen des 19. Jahrhunderts läßt sich dieses Problem genausowenig lösen wie allein mit hervorragender technisch-wissenschaftlicher Sachkenntnis. Auch die Persönlichkeiten, an deren Urteil sich die politischen Gremien bisher so gern angehängt haben, können da nur ein Stück weit helfen. So besteht die Gefahr, daß in einem Dickicht von Emotionen, unzureichender Sachkenntnis und politischer Rücksichtnahmen Entscheidungen gefällt werden, die den Weg in die Zukunft verbauen.
Ja, die Kernkraft bietet uns eine Chance, unsere Chance. Der Weg, den die Bundesrepublik Deutschland zur Nutzung dieser Chance eingeschlagen hat, ist sicher nur einer von mehreren möglichen, und es wird sich nie beweisen lassen, ob es nicht auch einen besseren gegeben hätte. Auf alle Fälle ist es aber ein interessanter und in mancher Hinsicht origineller Weg. Es ist unser Weg.


32
29
28
27
26

Die heutige Generation

Erfolg und Durchbruch der Leichtwasser-Reaktoren

Als man Anfang der fünfziger Jahre daran ging, Kernreaktoren für die Elektrizitätserzeugung zu entwickeln, stand man vor einer verwirrenden Vielfalt unterschiedlicher Konstruktionsmöglichkeiten. Ob Brennstoff oder Neutronen-Moderator, Kühlmittel oder Aufbau des Reaktorkerns – fachlich als Core bezeichnet –, für jedes dieser Grundelemente bieten sich theoretisch sehr unterschiedliche Werkstoffe und sehr verschiedenartige konstruktive Lösungen an: Als Kühlmittel kommen verschiedene Gase, flüssiges Metall, Wasser, Salzschmelzen oder auch organische Verbindungen in Frage. Als Neutronen-Moderator und -Reflektor können Graphit, leichtes Wasser, Schweres Wasser, Beryllium und Metallhydride dienen, oder man kann sich überlegen, auf den Moderator ganz zu verzichten und im Core mit schnellen Neutronen zu arbeiten.
Beim Kernbrennstoff steht man vor der grundsätzlichen Frage, das Uran in seiner natürlichen Isotopenzusammensetzung, also als Natururan, zu verwenden oder aber den spaltbaren Anteil künstlich anzureichern, also angereichertes Uran zu nehmen. Unabhängig davon läßt sich das Uran in metallischer Form oder als Oxidverbindung einsetzen. Eine andere Frage ist die der Form und »Verpackung« des Kernbrennstoffs. Man kann ihn in der Form von Kugeln oder langer Stäbe – Brennelemente genannt – in den Reaktorkern bringen, oder auch ein Einsatz des Urans als Stickstoff-, Schwefel- oder Phosphorverbindung in wässeriger Lösung ist möglich. So erhält man einen heterogenen oder homogenen Reaktoraufbau. Beim heterogenen Reaktorcore kann man wiederum zwischen verschiedenen »Ver-

Blick auf die Brennelementladung des Druckwasser-Reaktors im Kernkraftwerk Obrigheim während der ersten Beladung. Als hinreichend viele Brennelemente im Wasser nebeneinander standen, setzten die energieerzeugenden Kernspaltungs-Kettenreaktionen ein. Der Reaktor wurde kritisch, wie es im Fachjargon heißt.

packungsmaterialien«, zwischen verschiedenen Hüllwerkstoffen der Brennelemente wählen, zum Beispiel zwischen Aluminiumlegierungen, Stahl oder Graphit.
Zum Glück verbietet schon die Physik eine beliebige Kombination aller dieser Parameter. Doch noch im Jahre 1956 führte eine Zusammenstellung der Zeitschrift »Die Atomwirtschaft« nicht weniger als neun verschiedene Typen von Leistungsreaktoren für künftige Kernkraftwerke auf. Dazu kamen noch sieben verschiedene – doch zum Teil ähnlich aufgebaute – Typen von Forschungsreaktoren. Wie sollte sich hier die Spreu vom Weizen trennen lassen? Wie würde man den leistungsfähigsten und rationellsten Typ herausfinden, das Kernkraftwerk der Zukunft?
Dieses Problem hat sich inzwischen praktisch von selbst gelöst. Das Feld der Konkurrenten hat sich so gelichtet, und die Rangordnung der Übriggebliebenen ist so eindeutig, daß alle, ehedem so leidenschaftlich geführten, theoretischen Diskussionen über Vor- und Nachteile bestimmter Reaktortypen gegenstandslos geworden sind. In diesem Stil wird allenfalls noch bei den Brütern diskutiert, die aber ohnehin erst für die nächste Kernkraftwerks-Generation in Frage kommen. Bei der heutigen Generation bestimmen die Druckwasser- und Siedewasser-Reaktoren das Feld. Sie haben längst die Graphit-Reaktoren abgehängt und lassen zur Zeit auch den Schwerwasser-Reaktoren nicht viel Raum. Ihr Leistungsanteil beträgt heute in der Welt, betrachtet man die bereits in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke, knapp 50 Prozent, bei den in Bau befindlichen und bestellten Kernkraftwerken erreicht der Anteil der Druck- und Siedewasser-Reaktoren jedoch bereits über 84 Prozent. In der Bundesrepublik liegt dieser Anteil mit 94 Prozent sogar noch ein Stück höher. Wie konnte es dazu kommen?

Europas erste Entwicklungsschritte

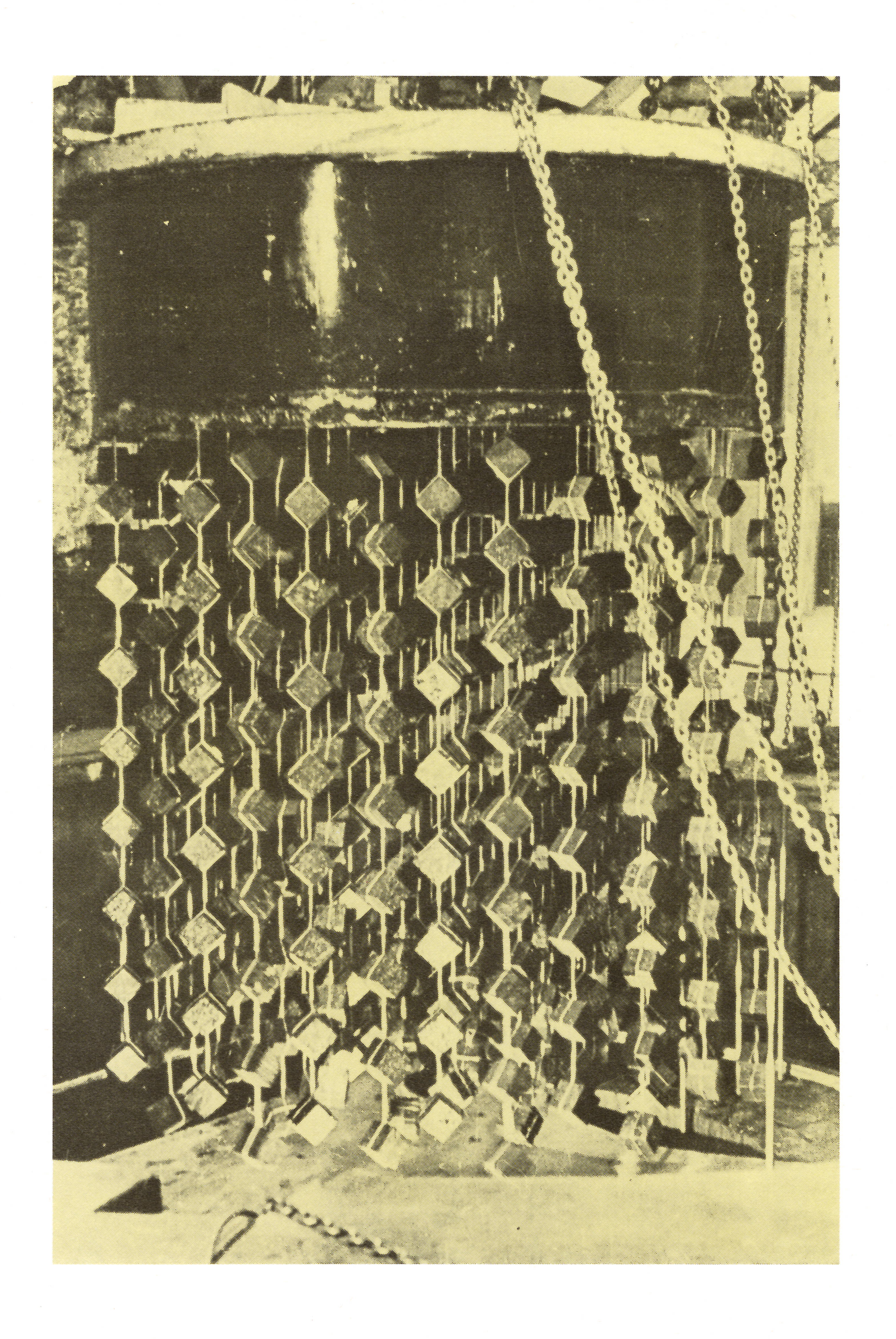
Sieht man, wie in der Bundesrepublik Deutschland gegenwärtig die großen Kernkraftwerke – Pilzen nach dem Regen vergleichbar – aus dem Boden schießen, dann mag man glauben, dahinter habe eine sehr planmäßige Entwicklungsförderung gestanden, der Erfolg sei langfristig geplant und sorgfältig vorbereitet gewesen. Doch das Gegenteil war der Fall. Die deutsche Kernkraftwerks-Entwicklung begann mit einem außerordentlich vielfältigen und entsprechend verzettelten Förderungsprogramm. Aus dem schälten sich erst nach und nach die wirklich zukunftsträchtigen Entwicklungen heraus, und die waren alle langfristiger Natur und auf die nächsten Kernkraftwerksgenerationen ausgerichtet. Die schließlich zum Durchbruch gekommenen Leichtwasser-Reaktoren wurden im wesentlichen von der deutschen Reaktorindustrie allein, ohne die Hilfe staatlicher Forschungszentren und mit sehr wenig staatlichem Geld, entwickelt. Sie stützte sich dabei für den Start teils mehr und teils weniger auf Lizenzen amerikanischer Firmen. Das

erste große deutsche Atomkraftwerk – die mit einem Siedewasser-Reaktor ausgestattete 240-MW-Anlage in Gundremmingen an der oberen Donau – wurde kurioserweise außerhalb des deutschen Atomprogramms errichtet. Dieses Projekt gehörte zum Euratom/USA-Kernkraftwerkprogramm, das von Europa Anfang der sechziger Jahre nur widerstrebend akzeptiert wurde. Es war von amerikanischer Seite nicht nur als Hilfe für Europa, sondern auch als Starthilfe für die eigene Reaktorindustrie gedacht. Doch dann entwickelte sich daraus die einzige heute von der amerikanischen Kernkraftwerks-Industrie ernstgenommene Konkurrenz.

Das Pionierland für die Erschließung der Kernenergie zur Stromversorgung war – auch wenn dabei der Wunsch nach Bomben-Plutonium im Hintergrund stand – zweifellos Großbritannien. Dort wurde bereits im Oktober 1956 der Generator der ersten Baustufe des berühmten Natururan-Graphit-Kernkraftwerks in Calder Hall an das öffentliche Netz geschaltet. In schneller Folge kamen hier drei weitere Reaktoren dazu, und vier Leistungsreaktoren der gleichen Größe wurden im benachbarten Chapelcross errichtet. Schließlich standen 16 weitere große Reaktoren in acht über das ganze Land verstreuten Kernkraftwerken, darunter Reaktorblöcke mit einer elektrischen Leistung bis zu 330 MW. Alle zusammen haben bis heute (Frühjahr 1971) etwa 200 Milliarden (10^9) Kilowattstunden erzeugt, etwa doppelt so viel wie sämtliche amerikanischen Kernkraftwerke. Alle britischen Kernkraftwerke arbeiten mit Natururan, CO_2-Gaskühlung und Graphit-Moderator.

Die nächsten Kernkraftwerke des britischen Programms, die jetzt der Fertigstellung entgegengehen, sind mit sogenannten Advanced Gas-cooled Reactors (AGR) ausgerüstet. Sie unterscheiden sich von den Reaktoren der ersten Stunde dadurch, daß das Uran leicht angereichert ist, daß es nicht mehr als Metall, sondern als Oxid eingesetzt wird und daß es sich in Edelstahl-Hüllrohren anstelle der ursprünglich verwendeten Leichtmetallrohre befindet. Dadurch lassen sich die Temperaturen im Kühlkreislauf um mehr als 200 Grad erhöhen und der thermische Wirkungsgrad des Kraftwerks entsprechend verbessern. Der Kernbrennstoff hält länger und vor allem wird das Volumen des Reaktor-Cores wesentlich kleiner, weil der angereicherte Brennstoff eine höhere Energiedichte im Reaktorkern erlaubt. – Die AGR-Kernkraftwerke sind nach britischer Ansicht konkurrenzfähig. Trotzdem waren die intensiven britischen Bemühungen, AGR-Kernkraftwerke im Ausland zu verkaufen, bisher erfolglos.

In Frankreich verlief die Entwicklung technisch ähnlich. Auch hier wurden die Weichen der Kernkraftwerksentwicklung sehr frühzeitig gestellt. Auch hier kam nur ein Natururan-Reaktor in Frage, denn auch hier wollte man neben der Elektrizität Plutonium für Atombomben gewinnen. Man baute also auch die voluminösen Natururan-Reaktoren mit Gaskühlung und Graphit-Moderation, insgesamt acht Kraftwerke dieses Typs mit maximaler Blockgröße von 540 MW elektrischer Leistung beim letzten Projekt dieser Reihe.



Das französische Atomenergie-Kommissariat hat an diesem Reaktortyp auch in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre noch verbissen festgehalten, mit dem Erfolg, daß der Bau von Kernkraftwerken in Frankreich ins Stocken geriet, als anderenorts der Kernkraftwerks-Boom einsetzte. Erst 1970, im Zuge einer Neuorientierung des französischen Atomenergieprogramms, konnte die staatliche französische Stromversorgungsorganisation ihr ursprünglich für einen gasgekühlten Natururan-Reaktor konzipiertes Kernkraftwerksprojekt in Fessenheim/Rhein auf einen Druckwasser-Reaktor nach amerikanischer Lizenz umstellen. Das Kraftwerk soll eine elektrische Leistung von 890 MW haben und Ende 1975 fertig werden. Das für den ersten Reaktorkern benötigte Uran wird in der Sowjetunion angereichert. Das französische Investitionsprogramm sieht jetzt für die kommenden fünf Jahre den Baubeginn weiterer vier Leichtwasser-Kernkraftwerke vor, darunter auch mit Siedewasser-Reaktoren.

Argumente für die Leichtwasser-Baulinie

In den USA wurde in der ersten Hälfte der fünfziger Jahre zunächst – fast spielerisch – die ganze Palette der möglichen Reaktorkonstruktionen durchprobiert. Eine Statistik von 1956 führt für die ganze Welt 76 Reaktoren auf, davon allein 53 für die USA. 20 von ihnen waren ausgesprochene Versuchsanlagen für spätere Kraftwerksreaktoren. Die großen Zentren der amerikanischen Atomenergie-Kommission bauten und testeten sie – zum Teil unter sehr extremen Betriebsbedingungen. Für die Produktion von Bomben-Plutonium gab es in den USA spezielle Produktionsreaktoren. Man stand unter keinerlei Druck, Kernkraftwerke zu bauen, bevor nicht ihre Wirtschaftlichkeit erwiesen sein würde.
So abenteuerlich aber auch manche amerikanischen Reaktorkonstruktionen jener Zeit aus heutiger Sicht erscheinen mögen, die Verwendung von normalem

Mit dieser simplen Core-Anordnung – 644 Uranmetallwürfel hingen an 78 Ketten in einem mit Schwerwasser gefüllten Behälter – versuchten deutsche Physiker aus der Umgebung von Werner Heisenberg noch im Februar 1945 eine Kernspaltungs-Kettenreaktion zu erreichen. Doch auch dieses letzte Experiment vor Ende des Zweiten Weltkriegs, durchgeführt in einem Brauereikeller des Städtchens Haigerloch, südlich von Stuttgart, blieb erfolglos. Die zur Verfügung stehenden Uran- und Schwerwassermengen von je etwa 1,5 Tonnen reichten nicht aus.

leichten Wasser für Moderation und Kühlung stand bei der amerikanischen Kernkraftwerksentwicklung von Anfang an im Vordergrund. Man hatte gleich erkannt, daß man dadurch eine sehr einfache und kompakte Reaktorkonstruktion bekommen würde, die wegen ihrer Einfachheit und Kompaktheit auch die geringsten Baukosten versprach. Konnte man sich etwas Einfacheres vorstellen als einen Reaktor, der im Prinzip nichts anderes ist als eine Ladung von Brennelementen, die im Wasser stehen und dieses Wasser ganz aus sich heraus – durch die in ihnen ablaufenden Kernspaltungs-Kettenreaktionen – aufheizen?
Die Überlegung, daß bei Anwesenheit von normalem Wasser im Core – das ist das Herzstück des Reaktors, sein Kern – das Uran in jedem Fall angereichert werden muß, war aus amerikanischer Sicht unerheblich. Die großen amerikanischen Anreicherungsanlagen hatten bereits damals mehr Atombomben-Sprengstoff produziert, als zur Vernichtung der Welt notwendig war. Eines Tages würde man froh sein, so sagte man sich, ihn sinnvoll für friedliche Zwecke einsetzen zu können. Natürlich würde die Anreicherung eine nicht unerhebliche Steigerung der Brennstoffkosten mit sich bringen, doch dafür sollten die Reaktoren selbst so wesentlich billiger werden. Dank der durch die Anreicherung möglichen höheren Energiedichte im Core würde man sie in sehr großen Leistungseinheiten bauen können, und gerade dadurch sollten die Stromerzeugungskosten sehr niedrig werden.
Diese Überlegungen sind durch die spätere Entwicklung voll bestätigt worden. – Zunächst bot der nukleare Antrieb der Marine-Fahrzeuge – vom U-Boot bis zum Flugzeugträger – den USA hinreichend Gelegenheit, Siede- und Druckwasser-Reaktoren im praktischen Betrieb zu entwickeln und zu erproben. Außerdem bestellten zahlreiche Stromversorgungsunternehmen auf eigene Rechnung – nur mit staatlicher Unterstützung bei den Forschungs- und Entwicklungskosten – kleine Kernkraftwerke, um damit praktische Erfahrung zu sammeln. 1965 setzte dann in den USA – von Europa aus gesehen wie aus heiterem Himmel – eine Flut von Kernkraftwerksbestellungen ein, die 1967 mit 27 Bauaufträgen über insgesamt 22740 Megawatt elektrischer Kraftwerksleistung einen absoluten Höhepunkt erreichte. Dabei wurden ausschließlich Druck- und Siedewasser-Reaktoren bestellt.

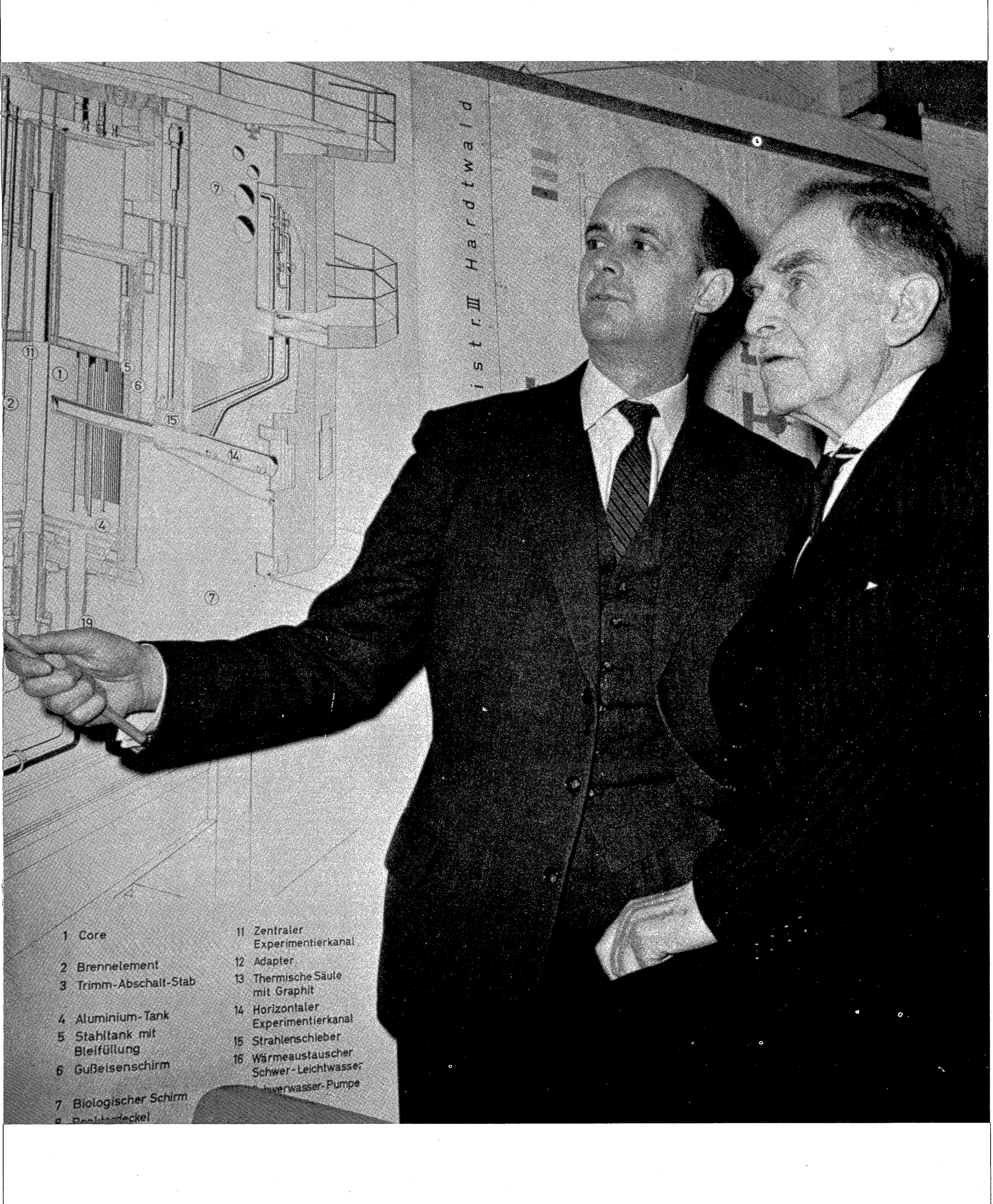
Der Weg der Bundesrepublik Deutschland

In Deutschland hatte man unmittelbar vor Kriegsende – im Frühjahr 1945 – vor der Fertigstellung eines eigenen ersten Kernreaktors gestanden, doch diese Entwicklung brach zunächst ab. Bis 1955 erlaubten die Besatzungsmächte keinerlei Beschäftigung mit Atomphysik und Reaktortechnik. Als die Bundesrepublik Deutschland dann ihre staatliche Souveränität – und damit auch ihre »Atomhoheit«

– zurückerhielt, gab es nur wenige weitsichtige Wissenschaftler, Wirtschaftler und Politiker, die die damit gegebene Chance voll erkannten. Eher neigte man zu der Auffassung, daß der Vorsprung der anderen Länder viel zu groß sei, als daß man hoffen könne, ihn in nicht zu ferner Zukunft einzuholen. Dementsprechend war die Bundesrepublik bei der ersten Genfer UNO-Konferenz über die Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwecken im August 1955 höchst ungenügend vertreten. Erst die danach einsetzende, weltweite Atom-Euphorie wurde für die Bundesrepublik zum Signal, aktiv zu werden. Doch was sollte geschehen, was konnte geschehen?
Nun – darin war man sich einig, und das entsprach der damaligen politischen Grundauffassung –, man wollte keine starke staatliche Zentralorganisation nach den Vorbildern der britischen Atomenergie-Behörde, der amerikanischen Atomenergie-Kommission oder des französischen Atomenergie-Kommissariats. Man schuf vielmehr nur ein spezielles Ministerium, das koordinieren und Geld bereitstellen sollte. Es entwickelte sich im Laufe der Zeit zum heutigen Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft. Reaktorentwicklung zu betreiben, sollte vor allem eine Sache der Industrie sein. Die dazu notwendige Forschung sollten die neu zu errichtenden Kernforschungszentren beisteuern. – Dieses Prinzip bewährte sich insofern, als die Reaktorentwicklung in der Bundesrepublik dadurch freigehalten wurde von Reaktor-Ideologien. Als sich der Durchbruch der Leichtwasser-Reaktoren abzeichnete, konnte man sich in Deutschland darauf schnell – und ohne daß jemand sein Gesicht verloren hätte – umstellen.
Andererseits führten die starken Industrieinteressen dazu, daß man glaubte, sich bei einem Bruchteil der zur Verfügung stehenden Mittel die Vielfalt des amerikanischen Reaktorprogramms leisten zu können. Das erste deutsche Leistungsreaktorprogramm, Anfang 1957 in Eltville am Rhein entwickelt, sah die Errichtung von fünf Versuchs-Kernkraftwerken mit einer elektrischen Leistung von je etwa 100 MW bis 1965 vor. Fünf Industriegruppen sollten mit fünf Energieversorgungsunternehmen zusammengehen, um die folgenden fünf Leistungsreaktor-Typen zu entwickeln: einen Schwerwasser-Natururan-Reaktor, einen gasgekühlten Natururan-Reaktor, einen gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktor, einen organisch moderierten Reaktor und schließlich einen Leichtwasser-Reaktor. – Diese Vielfalt, die sich in differenzierter Form auch noch im Nachfolgeprogramm niederschlug, hat einerseits zu einer Verzettelung geführt, die erst nach und nach überwunden werden konnte. Andererseits war man dadurch gut gerüstet für die weiterführenden Kernkraftwerks-Entwicklungen, aus denen sich dann ein origineller Hochtemperatur-Reaktor und das heutige Projekt Schneller Brüter mit seinen Kühlmittelvarianten als Zukunftsprojekte herausschälen konnten.
Ein drittes augenfälliges Merkmal der beginnenden deutschen Atompolitik war schließlich die starke Betonung der Forschung. Hier wirkte die deutsche Wissen-

schaftstradition nach. Andererseits ist unverkennbar, daß dadurch ein breites Fundament fähiger Ingenieure und Wissenschaftler geschaffen wurde.
So nahm die Entwicklung der Kerntechnik in der Bundesrepublik insgesamt einen etwas komplizierten Verlauf. Geradlinig verlief jedoch der offiziell zunächst nicht vorgesehene Weg zu den kommerziellen Leichtwasser-Kernkraftwerken. Das erste Exemplar dieser Reihe – und die erste stromliefernde Kernenergieanlage in der Bundesrepublik überhaupt – war das 15-MW-Versuchsatomkraftwerk in Kahl am Main, 1958 bestellt und seit 1961 – mit einigen Unterbrechungen für den Einbau von zusätzlichen Versuchseinrichtungen – in Betrieb. Als nächster Schritt kam das schon erwähnte Kernkraftwerk in Gundremmingen aus dem Euratom/USA-Kernkraftwerksprogramm hinzu, gleichfalls mit einem Siedewasser-Reaktor ausgerüstet, jedoch von heute 240 MW Leistung. Diese Anlage wurde 1962 bestellt und ist seit 1966 in Betrieb.
Dann folgten zwei parallel durchgezogene Kernkraftwerksprojekte, das mit einem Druckwasser-Reaktor ausgestattete Kernkraftwerk Obrigheim am Neckar mit einer elektrischen Leistung von 324 MW und das mit einem Siedewasser-Reaktor ausgestattete Kernkraftwerk in Lingen an der Ems. Hier werden 160 MW durch den Reaktor und 90 MW durch einen mit Schweröl oder Erdgas geheizten Überhitzer aufgebracht. Als man diese beiden Anlagen 1964 bestellte, betrachtete man die durch die Wasserreaktoren bedingte Rückkehr zu Sattdampfturbinen noch als erheblichen technischen Rückschritt und wollte in Lingen auf die – vorerst nur konventionell mögliche – Überhitzung nicht verzichten. Gegenüber dem gleichzeitig gebauten Kernkraftwerk Obrigheim erreichte man dadurch fast eine Verdoppelung der Dampftemperatur, doch die Steigerung des Wirkungsgrades betrug nur zwei Prozent. Beide Kraftwerke sind seit 1968 in Betrieb.
Nun mußte auch in der Bundesrepublik der Durchbruch der Leichtwasser-Kernkraftwerke kommen, die Bestellung des ersten rein kommerziellen Atomkraftwerks ohne staatliche Finanzierungshilfe. In den USA wurden Mitte der

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde das von Werner Heisenberg geleitete Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen erneut zur Keimzelle der deutschen Kernforschung und Kerntechnik. Karl Wirtz, der schon das Experiment in Haigerloch geleitet hatte und später mit seiner in Göttingen neu aufgebauten experimentellen Abteilung nach Karlsruhe übersiedelte, zeigt hier Otto Hahn, dem Entdecker der Kernspaltung, die Pläne des FR 2, des ersten selbständig in der Bundesrepublik errichteten Forschungsreaktors. Der Kernchemiker Otto Hahn verbat sich stets, als Atomphysiker bezeichnet zu werden, und behauptete gern, von Kernreaktoren nichts zu verstehen.


istr. III Hardtwald
1 Core
2 Brennelement
3 Trimm-Abschalt-Stab
4 Aluminium-Tank
5 Stahltank mit Bleifüllung
6 Gußeisenschirm
7 Biologischer Schirm
11 Zentraler Experimentierkanal
12 Adapter
13 Thermische Säule mit Graphit
14 Horizontaler Experimentierkanal
15 Strahlenschieber
16 Wärmeaustauscher Schwer-Leichtwasser

sechziger Jahre bereits für Standorte mitten in Kohlenrevieren Kernkraftwerksblöcke von über 1000 MW Leistung bestellt, aber die deutsche Elektrizitätswirtschaft wollte noch nicht »anbeißen«. Sie war durch staatliche Maßnahmen zugunsten der heimischen Kohle auf andere Wege gelockt worden. Trotzdem, 1967 war es dann soweit: Auftragsvergabe für die Kernkraftwerke in Stade an der Elbe (Druckwasser) und in Würgassen an der Weser (Siedewasser) mit einer elektrischen Leistung von 660 beziehungsweise 670 MW. Beide Kraftwerke sollen im Herbst 1971 in Betrieb genommen und 1972 voll auf das Netz geschaltet werden. Als nächste Bestellungen folgten 1969 Biblis am Rhein, mit einer Leistung von 1200 MW (Druckwasser), 1970 Brunsbüttel an der Elbe mit 805 MW und Philippsburg am Rhein mit 900 MW, beide mit Siedewasser-Reaktoren. Die weitere Entwicklung zeigt die Liste der deutschen Kernkraftwerksprojekte am Schluß des Buches. – Den ersten Exportauftrag für Kraftwerke dieser Entwicklungslinie erhielt die deutsche Kernkraftwerksindustrie 1969 aus Holland mit dem Druckwasser-Kernkraftwerk von 450 MW Leistung in Borssele bei Vlissingen. Unterdessen liegt ein zweiter Exportauftrag aus Österreich für ein Siedewasser-Reaktor-Kernkraftwerk von 700 MW Leistung vor.

Schwerwasser-Baulinie – nicht mehr gefragt?

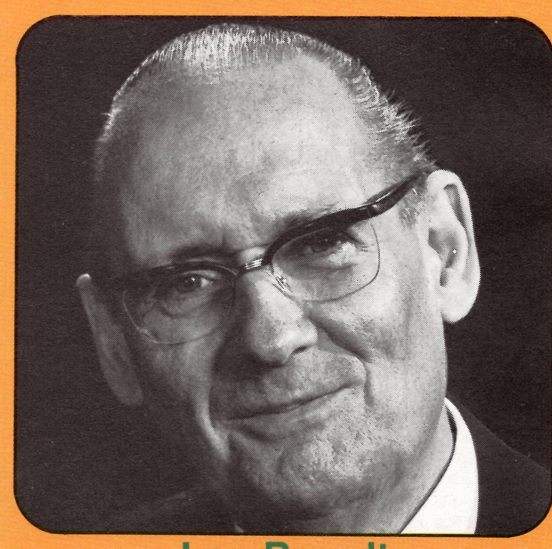
Ursprünglich standen die Signale für die deutsche Leistungsreaktor-Entwicklung anders. Sie war am Vorbild Kanadas orientiert, wo noch heute – und sicher auch auf absehbare Zukunft – die Kernkraftwerks-Entwicklung ganz auf die Verwendung von Natururan-Reaktoren mit Schwerwassermoderator eingestellt ist. Man

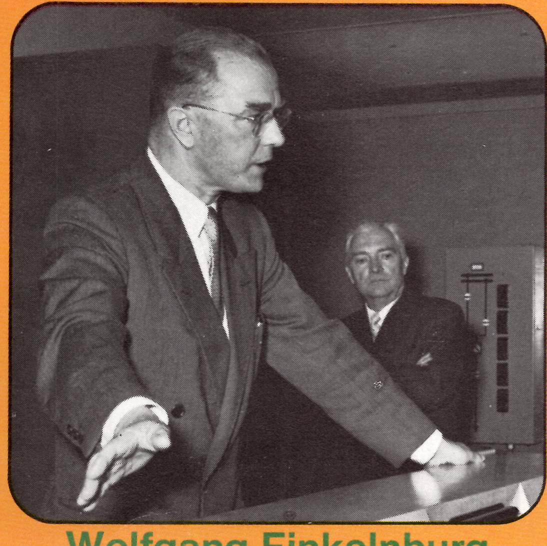
Ende der fünfziger Jahre setzte Siegfried Balke, damals Atomminister der Bundesrepublik, die Zielpunkte für das weitgesteckte deutsche Atomprogramm. Als Gründer der Kernforschungsanlage Jülich und rühriger Verfechter staatlichen Engagements in der Kernforschung stand ihm Leo Brandt, Staatssekretär des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen, zur Seite. In der jungen deutschen Atomindustrie war Wolfgang Finkelnburg die überragende Persönlichkeit der ersten Stunde. Die weiterführenden deutschen Kernkraft-Projekte liegen heute in den Händen einer jüngeren Generation: Arnulf Schlüter, wissenschaftlicher Direktor des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching bei München, wo man sich intensiv um die Entwicklung des Fusionsreaktors bemüht; Wolf Häfele, Leiter des »Projekt Schneller Brüter«; Rudolf Schulten, Verfechter des Kugelhaufen-Hochtemperatur-Reaktors. Schlüter, Häfele und Schulten saßen vor 15 Jahren als junge Physiker im Göttinger Max-Planck-Institut für Physik.

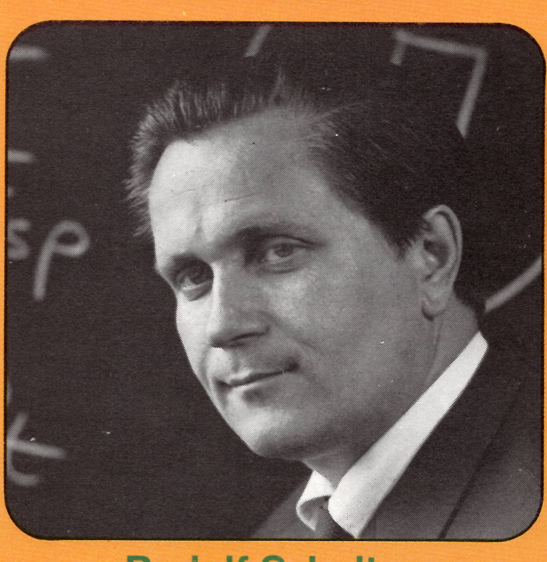

Siegfried Balke


Arnulf Schlüter

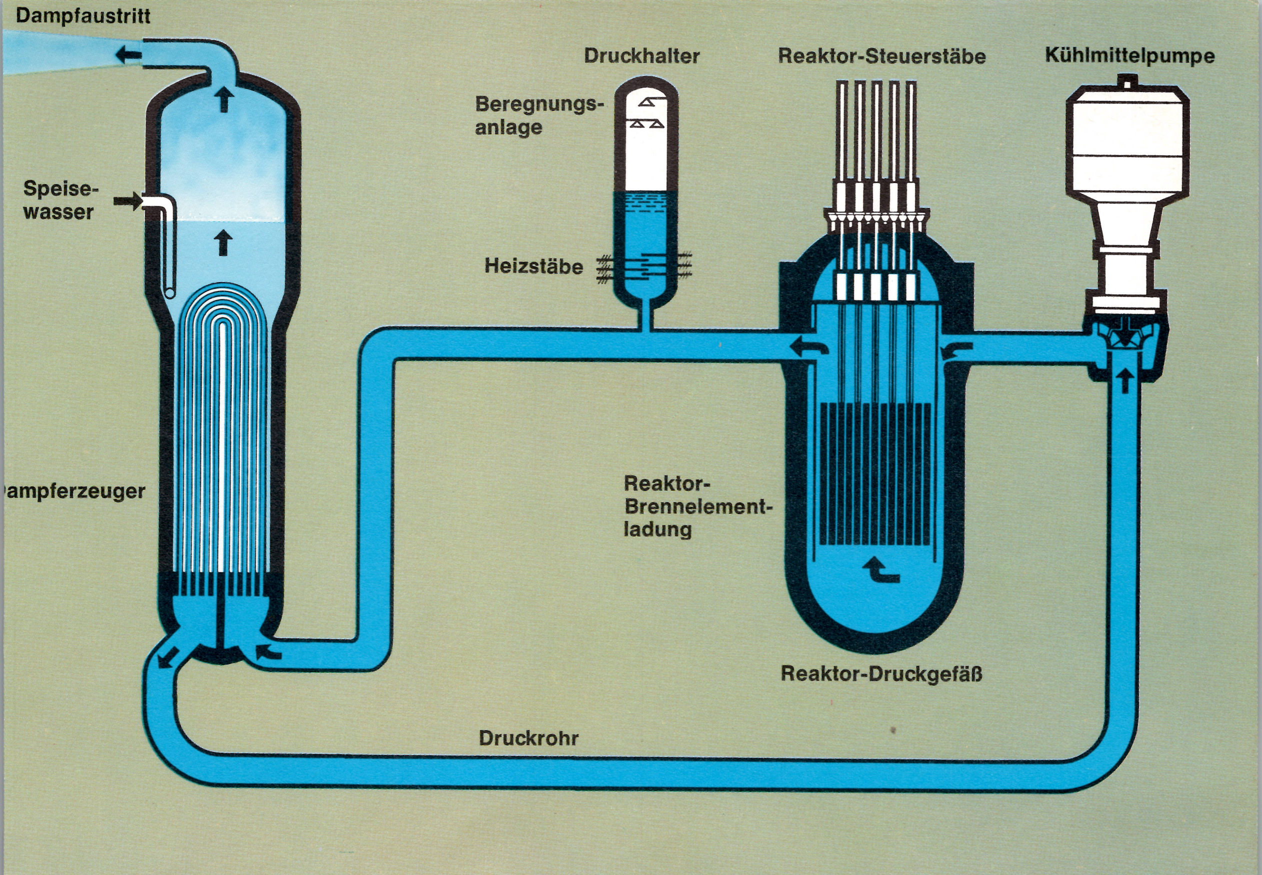

Wolf Häfele


Leo Brandt


Wolfgang Finkelnburg

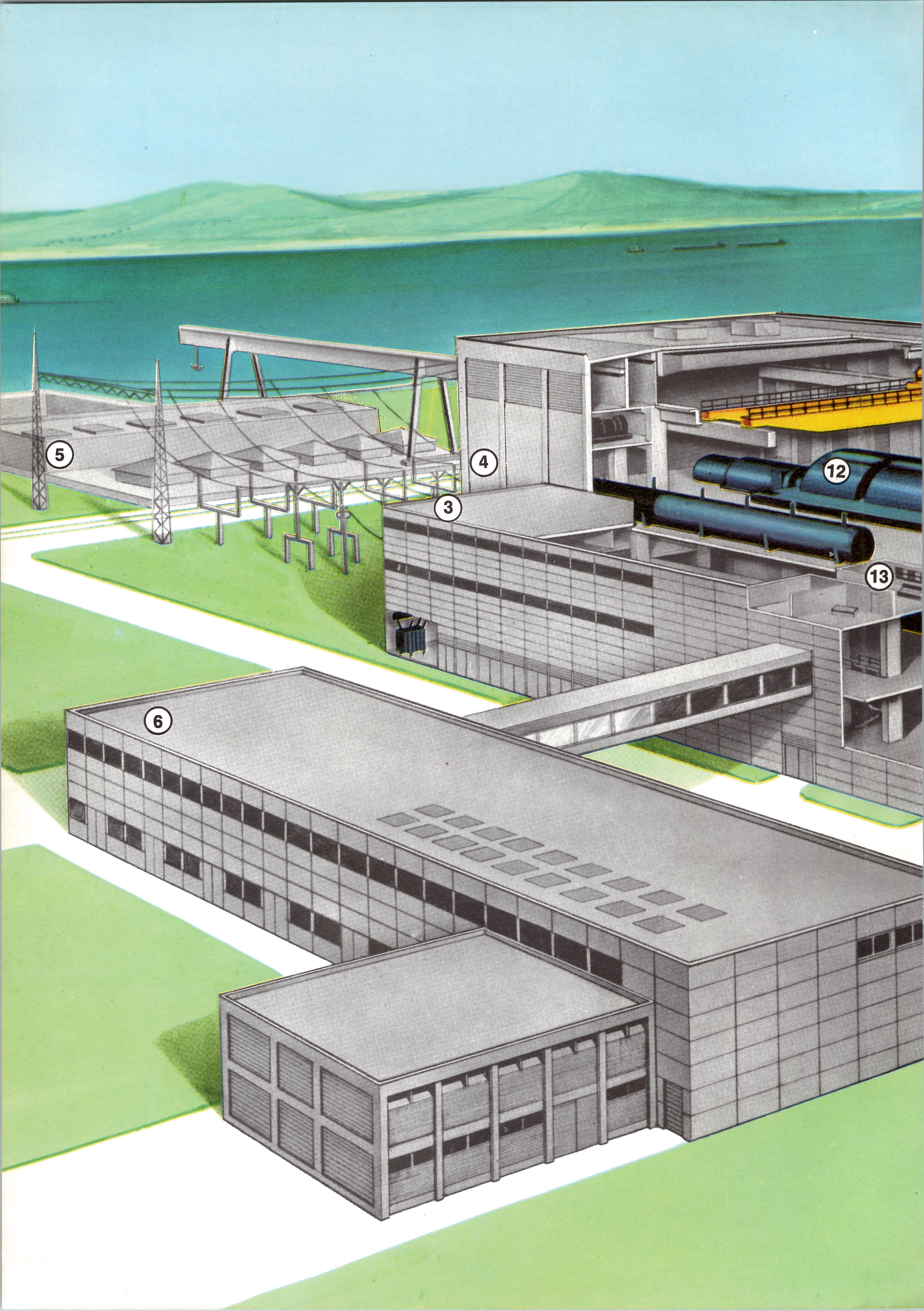

Rudolf Schulten

vertritt in Kanada das Prinzip der »Wasseranreicherung«: Statt die Qualität des Kernbrennstoffs durch Erhöhung des spaltbaren Isotopenanteils zu verbessern, wird ein hochqualitativer Moderator verwendet, eben Schwerwasser (D_2O). Das in den üblichen Druck- und Siedewasser-Reaktoren als Moderator wirkende normale Wasser verschluckt so viele Neutronen der energieliefernden Kettenreaktionen, daß man Leichtwasser-Reaktoren mit nicht angereichertem Natururan überhaupt nicht in Gang setzen kann. Schwerwasser geht dagegen mit den freien Neutronen sehr behutsam um und bremst sie wirklich nur ab, ohne allzu viele von ihnen zu verschlucken. So kann man also die üblichen Wasserreaktoren auch mit Natururan betreiben, wenn man das H_2O durch D_2O ersetzt. Leider verteuert das Schwerwasser jedoch die Investitionskosten erheblich, und leider sind Reaktoren dieses Typs wegen des größeren Core-Volumens in ihrer Leistungsgröße begrenzt.
Kanada, das über große Uranerzvorkommen verfügt und dessen Wasserkraftwerke günstige Voraussetzungen zur Produktion von Schwerwasser bieten, hat bereits 1962 ein kleines D_2O-Versuchskernkraftwerk von 25 MW in Betrieb genommen, dessen Reaktor zunächst nach dem Druckwasserprinzip arbeitete. Er wurde 1968 zu einem Siedewasser-Reaktor umgebaut. Der »Durchbruch« der großen Schwerwasser-Kernkraftwerke zur Wirtschaftlichkeit erfolgte in Kanada 1965 mit der Bestellung einer 2000-MW-Anlage, die zur Zeit in der Nähe von Toronto gebaut wird. Sie besteht aus vier Reaktorblöcken von je 500 MW Leistung, von denen die ersten zwei noch 1971 in Betrieb gehen sollen. Als nächstes Großprojekt wurde in Kanada der Bau einer 3000-MW-Station in der Provinz Ontario bekanntgegeben, wieder mit vier Blöcken. Kleinere Schwerwasser-Kernkraftwerkblöcke bauen kanadische Unternehmen in Indien und Pakistan, wo großes Interesse an der direkten Verwendung des heimischen Natururans besteht.
Bei aller Vielfalt, die das deutsche Kernkraftwerksprogramm während der ersten Jahre beherrschte, galt die besondere Aufmerksamkeit doch der Schwerwasser-Baulinie. Für ein Land ohne eigene Urananreicherung erschien es unverantwortlich, auf eine andere Karte zu setzen als die Verwendung von Natururan. Da in der zweiten Hälfte der fünfziger Jahre schon die natürlichen Grenzen der gasgekühlten Graphit-Natururan-Reaktoren englischer und französischer Bauart zu erkennen waren, kamen für die Bundesrepublik nur noch Schwerwasser-Reaktoren in Frage. So wurde das Konzept des ersten in Deutschland nach eigenen Entwürfen zu bauenden Forschungsreaktors von der ursprünglich vorgesehenen Graphit-Moderation auf Schwerwasser-Moderation umgestellt. Dieser FR 2 (Forschungsreaktor 2) ähnelte dann in seinen Grundzügen dem kanadischen Forschungsreaktor NRX. Sein Bau sollte für die junge deutsche Atomindustrie das Gesellenstück sein. Er wurde im Norden von Karlsruhe als das wichtigste Instrument des dort ab 1957 langsam entstehenden, großen deutschen Kernforschungszentrums errichtet und



Prinzip des Druckwasser-Reaktors. Das im Druckgefäß durch die Brennelemente erhitzte Wasser wird durch eine Pumpe in Umlauf gehalten und gibt seine Wärme in einem Wärmetauscher an einen zweiten Wasserkreislauf zur Dampferzeugung ab. Ein Druckhalter sorgt dafür, daß in diesem primären Wasserkreislauf ein Druck von knapp 160 Atmosphären aufrechterhalten bleibt und das Wasser trotz einer Temperatur von 300 Grad Celsius und mehr nicht zum Sieden kommt. Beim Siedewasser-Reaktor entsprechen dagegen die Brennelemente den Rohrbündeln des Wärmetauschers. Hier entsteht bereits im Reaktor-Druckgefäß bei nur etwa 70 Atmosphären der Turbinendampf.

Seiten 34/35: Blick in ein modernes Kernkraftwerk mit Druckwasser-Reaktor, hier das Kernkraftwerk Biblis am Rhein, mit einer elektrischen Leistung von 1200 MW. Man erkennt die kugelförmige Stahlhülle, die als sogenanntes Containment den primären Kühlkreislauf mit dem Reaktor-Druckgefäß und den vier Dampferzeugern umschließt. Die massiven Betoneinbauten dienen teils der Strahlungsabschirmung, teils dem Schutz des Containments, wenn ein Wärmetauscher oder ein Druckrohr reißen sollte.



5
4
3
12
13
6



1 Reaktorgebäude
2 Reaktorhilfsanlagengebäude
3 Betriebs- und Schaltanlagengebäude
4 Maschinenhaus
5 Kühlwasserpumpenhaus
6 Kraftwerknebenanlagengebäude
7 Abluftkamin
8 Reaktor
9 Dampferzeuger
10 Brennelementlagerbecken
11 Lademaschine
12 Turbosatz
13 Blockwarte

Technischer Steckbrief des Kernkraftwerks Biblis

Gesamtanlage

Elektrische Nennleistung (brutto)	1204 MW
Elektrische Nennleistung (netto)	1146 MW
Wärmeleistung	3462 MW
Kraftwerkswirkungsgrad (netto)	33,2 %
Laständerungsgeschwindigkeit zwischen 40 und 100 % Last	15 % je Minute
Reaktorkühlmitteldurchsatz	72000 t/h
Kühlmitteldruck am Reaktoraustritt	158 ata
Kühlmitteltemperatur am Reaktoraustritt	316 °C
Frischdampfmenge	6538 t/h
Frischdampfdruck	52 ata
Frischdampftemperatur	265 °C
Speisewasserendtemperatur	207 °C

Nukleares Dampferzeugungssystem

Mittlere Heizflächenbelastung	57 W/cm^2
Mittlere Brennstoffleistung	35 kW/kg U
Leistung je Liter Reaktorkern	87 kW/dm^3
Reaktorkern	
Anzahl der Brennelemente	193
Anzahl der Brennstäbe je Element	236
Brennstablänge (aktiv)	3900 mm
Brennstab-Außendurchmesser	10,75 mm
Gesamtgewicht eines Elements	etwa 750 kg
Brennstoff	Urandioxid
Mittlere Anreicherung des 1. Kerns	2,58 Gew.-Proz.
Mittlere Anreicherung der Nachlademenge	3,0 Gew.-Proz.
Urangewicht	99,2 t
Reaktordruckgefäß	
Innendurchmesser des zylindrischen Teils	5000 mm
Wanddicke des Zylindermantels	235 + 4 mm
Gesamthöhe	12850 mm
Gesamtgewicht	etwa 530 t
Dampferzeuger	
Anzahl	4
Heizfläche je Dampferzeuger	4510 m^2
Gesamthöhe des Dampferzeugers	18650 mm
Gesamtgewicht je Dampferzeuger	etwa 280 t
Hauptkühlmittelpumpen	
Anzahl	4
Fördermenge	18000 t/h
Motorleistung	8300 kW
Steuerstäbe	
Anzahl	61
Steuerstabfinger je Stab	20
Sicherheitshülle	
Kugeldurchmesser	56 m
Auslegungsdruck	4,8 atü

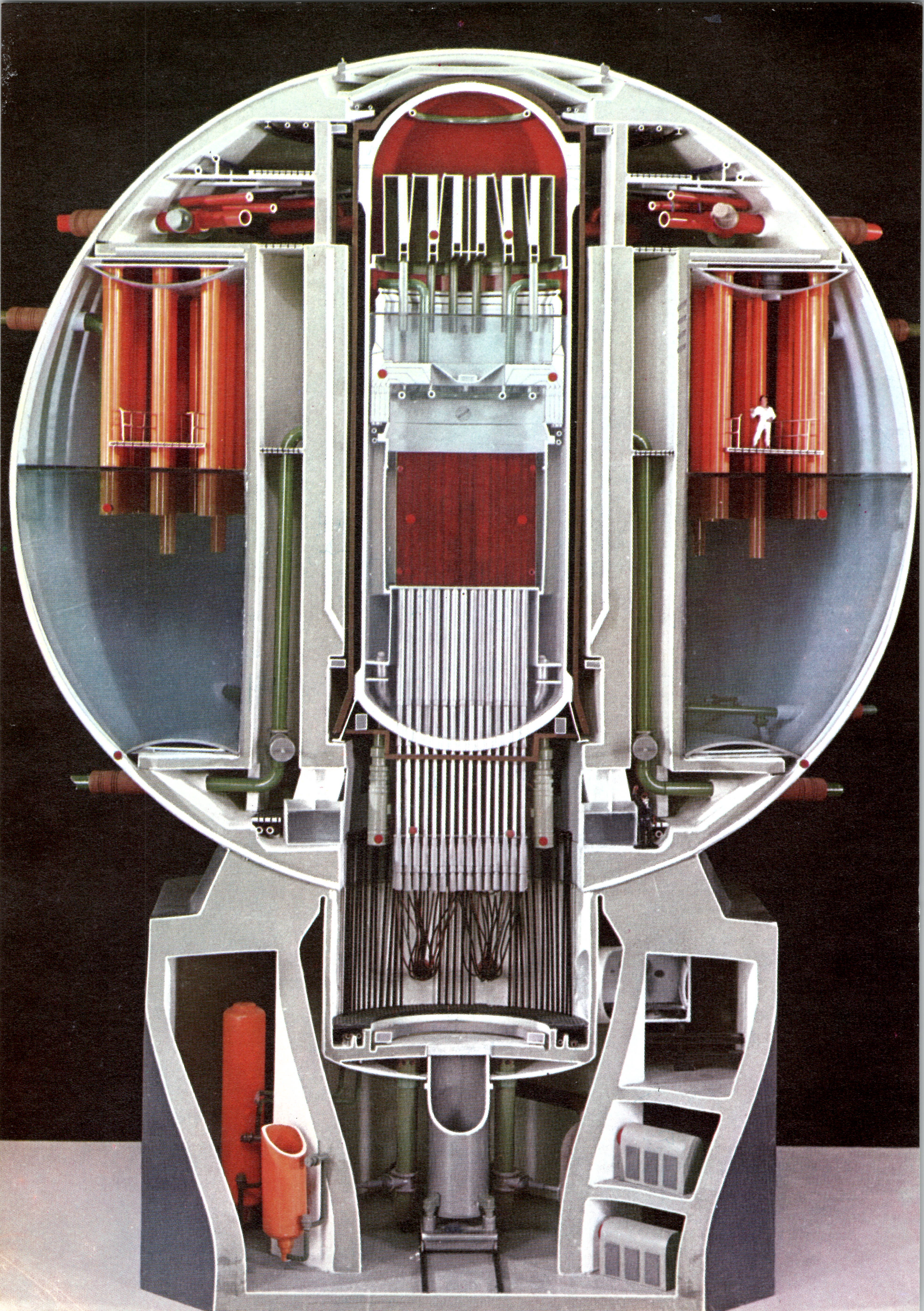
Dampfkraftanlage

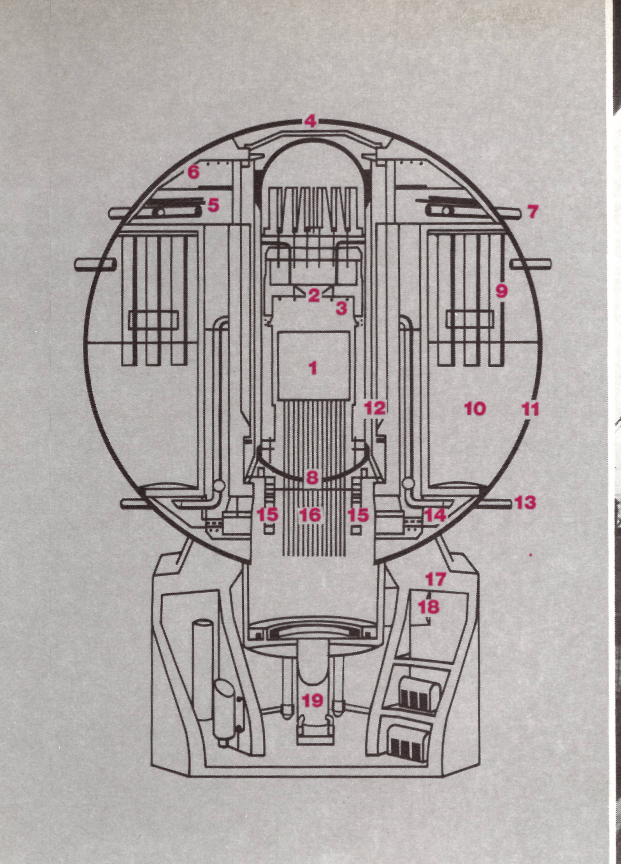
Turbosatz	
Turbinengehäuse	1 HD zweiflutig 3 ND zweiflutig
Drehzahl	1500 U/min
Frischdampfdruck	50,7 ata
Frischdampftemperatur	263,5 °C
Druck vor ND-Teil	9,75 ata
Temperatur vor ND-Teil	220 °C
Kondensatordruck	0,04 ata
Kühlwassermenge	200000 m^3/h
Außendurchmesser des letzten Schaufelrades	5,6 m
Endschaufellänge	1365 mm
Generator-Scheinleistung	1500 MVA
Klemmenspannung	27 kV
Frequenz	50 Hz
Kühlmittel für Ständer- und Läuferwicklung	Wasser
Gewicht des Ständers	etwa 440 t
Gewicht des Läufers	etwa 200 t
Länge des Turbosatzes	etwa 62 m

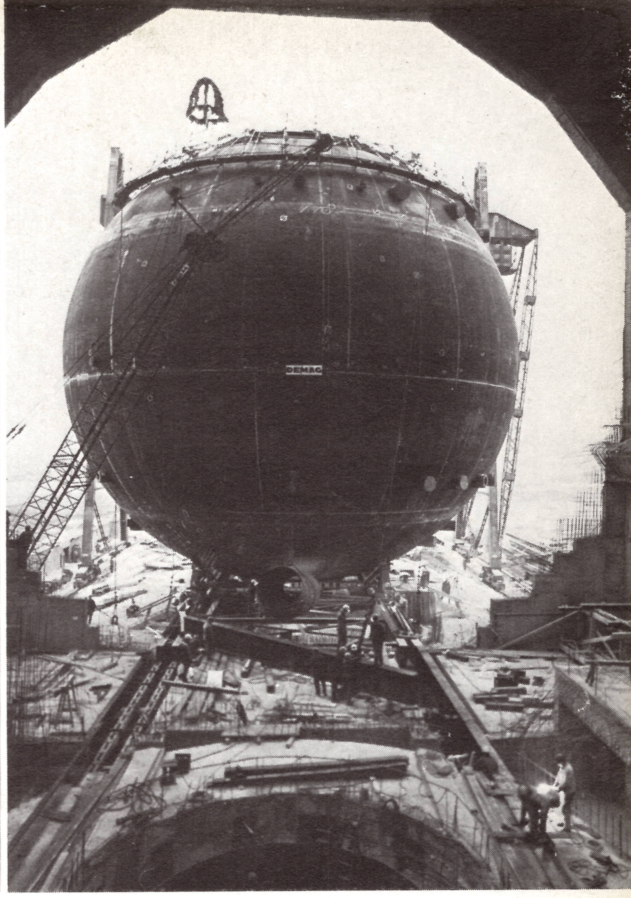
1963 endgültig fertiggestellt. Später tauschte man seine ursprünglichen Natururan-Brennelemente gegen Elemente mit leicht angereichertem Uran aus, so daß er heute nach wie vor ein sehr wirkungsvolles Forschungsinstrument der Kernphysik ist.
Noch vor der Fertigstellung des FR 2 begann, gleichfalls auf dem Gelände des Karlsruher Forschungszentrums, der Bau eines D_2O-Versuchskernkraftwerks von 50 MW Leistung, offiziell als Mehrzweck-Forschungsreaktor bezeichnet und entsprechend mit mehreren Versuchsmöglichkeiten zur Brennelementbestrahlung versehen. Dieser Natururan-Schwerwasser-Reaktor, eine Druckkesselkonstruktion, wurde erstmals 1965 kritisch, das heißt, zum ersten Mal entwickelten sich nicht mehr abbrechende Kernspaltungs-Kettenreaktionen. 1966 begann die Stromerzeugung. Bei diesem Leistungsreaktor lassen sich die Brennelemente während des Betriebs austauschen. Das führte anfänglich gelegentlich zu Schwierigkeiten, doch insgesamt ließ diese Prototyp-Anlage eine hohe Betriebszuverlässigkeit für größere Kraftwerke dieses Typs erkennen.

Exporterfolg durch Neutronen-Ökonomie

Mit einem Schwerwasser-Kernkraftwerk von 320 MW Leistung für Argentinien erhielt die deutsche Reaktorindustrie schließlich 1968 ihren ersten Exportauftrag. Es geht dabei um die schlüsselfertige Errichtung des Kernkraftwerks Atucha, 100 Kilometer nördlich von Buenos Aires, am Westufer des Rio Paraná bis 1973. Atucha ist überhaupt das erste Kernkraftwerkprojekt in Südamerika. Gegen starke internationale, auch nordamerikanische Konkurrenz hatte man sich damals durchsetzen können. Nachdem dem Schwerwasser-Reaktor in Deutschland mit dem Durchbruch der Leichtwasser-Reaktoren der Erfolg versagt bleiben sollte, erwies er sich nun zumindest als Exportschlager. Argentinien mit seinen großen Uranvorkommen erschien es als sehr wichtig, in seiner Kernbrennstoffversorgung nicht von den Anreicherungsanlagen der USA abhängig zu sein, schon um dafür nicht teure Dollars aufbringen zu müssen. Allerdings kosten die 300 Tonnen D_2O, die man zur Erstausstattung des Kernkraftwerks Atucha braucht, etwa 60 Millionen DM. Schwerwasser ist etwa zehnmal so teuer wie guter Whisky.
Um das D_2O-Inventar der Schwerwasser-Druckkessel-Reaktoren zu reduzieren – und zugleich um von der Begrenzung loszukommen, die durch die maximal mögliche Größe des Druckkessels gegeben ist –, hat man sich noch einer zweiten Schwerwasser-Reaktorkonstruktion angenommen, der Druckröhrenkonstruktion. Das Kühlmittel wird vom Moderator getrennt, und die Brennelemente stecken in einem Bündel paralleler Rohre, durch die leichtes Wasser oder auch Kohlensäuregas als Kühlmittel strömen kann. Leider verschlechtern die Druckrohre jedoch





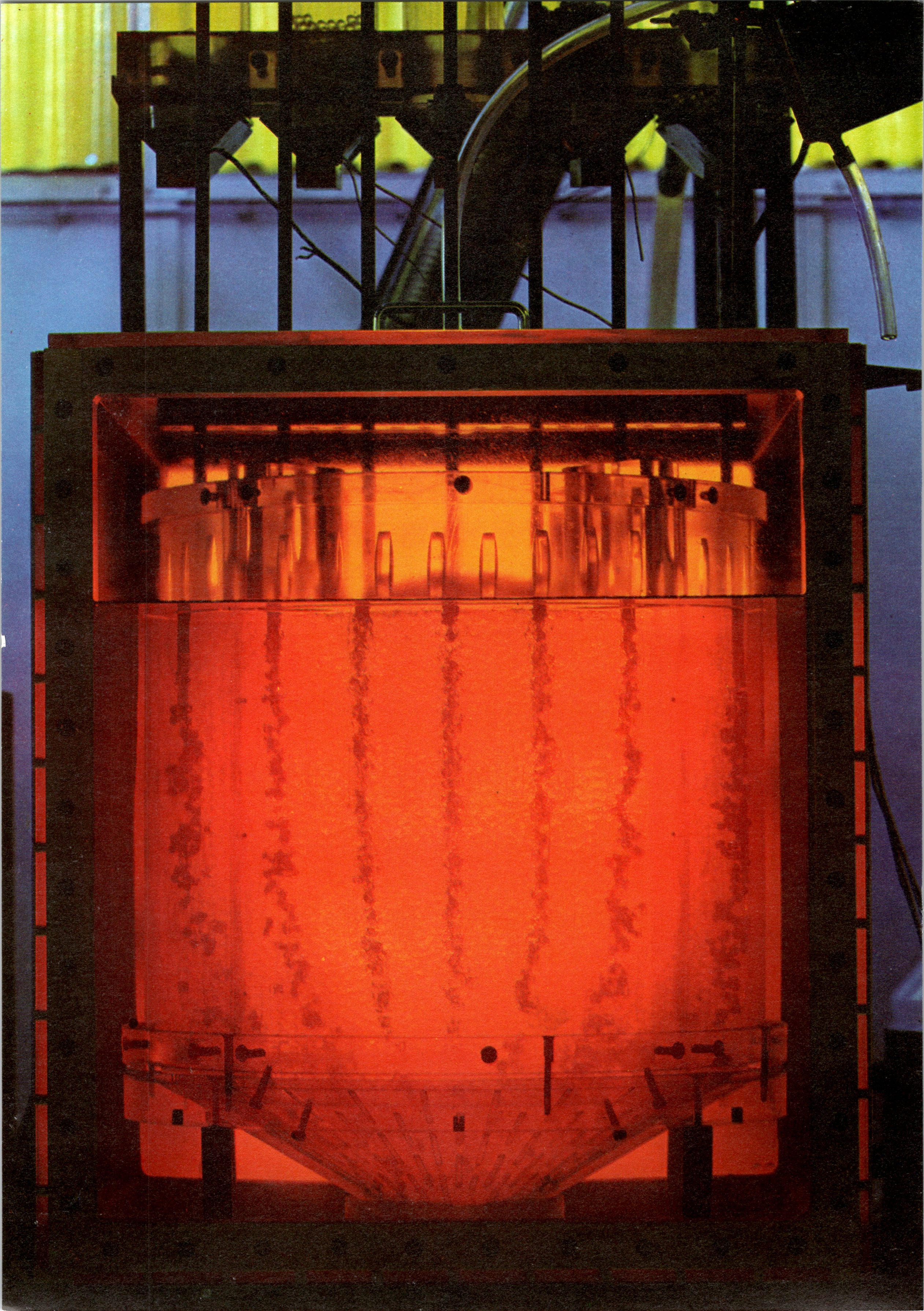


Das Schnittmodell der Siedewasser-Reaktor-Druckschale läßt die Kondensationskammern erkennen, durch die eine so enge Druckschalen-Konstruktion möglich wird. Bei einem Dampfleitungsbruch schlägt sich der Dampf hier nieder und kann die äußere Druckschale nicht sprengen. So lassen sich das Reaktorgebäude und die kugelförmige Druckschale voneinander getrennt bauen. Erst später wird die Druckschale, wie oben rechts zu sehen, in das Reaktorgebäude geschoben.

1 Brennelementladung (Core) 2 Dampftrockner 3 Rohre für Notkühlung 4 Beladedeckel 5 Oberer Ringraum 6 Splitterschutzbeton 7 Frischdampfleitung 8 Reaktordruckgefäß 9 Kondensationsrohre 10 Kondensationskammer (Wasserbereich) 11 Druckschale 12 Biologischer Schild 13 Speisewasserleitung 14 Unterer Ringraum 15 Umwälzpumpen 16 Steuerstabantriebe 17 Fundament 18 Personenschleuse 19 Montagestutzen

so sehr die Neutronenökonomie im Reaktorkern, daß man mit Natururan nur noch schlecht zurechtkommt und sich eine minimale Anreicherung des Kernbrennstoffs empfiehlt. So läßt sich die Verweildauer der Brennelemente im Reaktor um 50 Prozent erhöhen, während die Brennstoffkosten nur um 20 Prozent steigen. Nur das Hauptargument für Natururan-Reaktoren, von ausländischen Anreicherungsanlagen unabhängig zu sein, entfällt damit.
Für ein Schwerwasser-Versuchskraftwerk dieses Typs wurde noch 1966 in der Bundesrepublik ein Bauauftrag erteilt: das 100-MW-Kernkraftwerk in Niederaichbach an der Isar, etwa 70 Kilometer nordöstlich von München. Es wird mit CO_2-Kühlung arbeiten. Sein Reaktor-Core besteht aus 352 senkrechten Kühlkanälen. In der praktischen Ausführung geriet dieses Projekt erheblich in Verzug, weil die Schweißarbeiten an den 352 Druckrohren für mehr als ein halbes Jahr unterbrochen werden mußten und erst nach der Entwicklung eines neuen Schweißverfahrens zu Ende gebracht werden konnten. Doch im Spätherbst 1971 soll diese Reaktoranlage jetzt erstmalig kritisch werden. Unterdessen laufen die Vorbereitungen für den Bau eines großen Kernkraftwerks von 800 MW Leistung in unmittelbarer Nachbarschaft des Versuchskernkraftwerks Niederaichbach, . . . doch diese Anlage erhält einen Leichtwasser-Reaktor.
Wieweit sich die Betriebserfahrungen, die in den nächsten Jahren mit dem Niederaichbacher Schwerwasser-Versuchskernkraftwerk erarbeitet werden, einmal in großen Kernkraftwerksprojekten niederschlagen können, ist noch weitgehend offen. Im Augenblick steht die Baulinie der Schwerwasser-Kernkraftwerke fast überall in der Welt – außer in Kanada – nicht hoch in Kurs. Die Schwerwasser-Reaktoren bieten den großen Vorteil einer unvergleichlich guten Neutronen-Ökonomie, die ihren Niederschlag findet in einer sehr rationellen Nutzung des Kernbrennstoffs und in einem sehr niedrigen Anteil der Brennstoffkosten an den Stromerzeugungskosten. Die Nutzung des spaltbaren Urananteils ist so gut, daß man für D_2O-Kernkraftwerke selbst bei minimaler Anreicherung später auf die Aufarbeitung der verbrauchten Brennelemente verzichten kann. Aber selbst dann, wenn man das Schwerwasser-Inventar nicht mit einkalkuliert, sind die Anlagekosten für Schwerwasser-Reaktoren immer noch um etwa 20 Prozent höher als bei vergleichbaren Leichtwasser-Reaktoren. Und da die Stromerzeugungskosten bei Kernkraftwerken ohnehin zu einem wesentlichen Teil durch die Amortisation der Baukosten bestimmt werden, schlagen sich diese Mehrkosten zu sehr im Stromerzeugungspreis nieder und machen diese Baulinie uninteressant, zumindest heute.
Doch das kann sich schon in einigen Jahren wieder ändern, nämlich sobald es im Brennstoffkreislauf zu wesentlichen Kostenverschiebungen kommt, sobald hier rein kommerziell kalkuliert wird. Vielleicht wird es eines Tages interessant, das ist die erste Überlegung, Kernkraftwerke zur Verfügung zu haben, in denen man das

aus den Leichtwasser-Reaktoren kommende, teilweise verbrauchte Uran direkt – ohne erneute Anreicherung – wieder verwenden kann, nachdem die »neutronenmordenden« Spaltprodukte entfernt wurden. Vielleicht wird es aber auch eines Tages interessant, das ist das zweite Argument, sogenannte Konverterreaktoren zu besitzen, die dank ihrer guten Neutronenökonomie während des Betriebes in erheblichem Umfang Plutonium für den weiteren Kraftwerksbetrieb erzeugen, ohne aber echte Brüter zu sein, die erheblich höhere technische Anforderungen stellen und darum nicht so leicht zu realisieren sind.



Zu neuen Dimensionen

Die nächsten Kernkraftwerks-Generationen

Der heute unumstrittene Sieg der Leichtwasser-Reaktoren ist ein Erfolg der Einfachheit, die den Aufbau dieser Reaktoren kennzeichnet. Doch eine einfache technische Lösung muß nicht immer die genialste sein, sie kann auch Hand in Hand mit einer gewissen Primitivität gehen. So fallen einem auch bei einer objektiven Betrachtung der Leichtwasser-Reaktoren zwei recht gravierende »Schönheitsfehler« auf, nämlich, sie vergeuden das Uran und arbeiten auf einem zu niedrigen Temperaturniveau. Zwar hat die Entwicklung der Sattdampfturbinen in den letzten Jahren einen gewaltigen Schritt nach vorn getan, so daß die niedrige Temperatur heute nicht mehr so bei der Umsetzung der Wärmeenergie in Elektrizität stört. Schlimmer ist es, daß dadurch die Beseitigung der Abfallwärme so viel schwieriger wird und daß deshalb auf lange Sicht die Kernkraftwerke auf Kollisionskurs mit den berechtigten Forderungen des Umweltschutzes geraten können. – Kurz und gut, es werden fortschrittlichere Kernkraftwerkskonzepte notwendig sein, um den seitherigen Sieg der Kernenergie zu festigen.
Eines dieser fortschrittlicheren Konzepte ist das des Hochtemperatur-Reaktors, eine sowohl in den USA wie in Großbritannien und in der Bundesrepublik verfolgte – und gerade hier als besonders zukunftsträchtig eingeschätzte – Entwicklung. Nach recht eindrucksvollen Ergebnissen mit einem kleinen Versuchskernkraftwerk dieses Typs entschloß sich im Sommer 1970 eine Gruppe von 13 deutschen Elektrizitäts-Versorgungsunternehmen, ein großes Thorium-Hochtemperatur-Prototyp-Kernkraftwerk zu bestellen, das jetzt in der Gemeinde Uentrop-

Das »Herz« des Hochtemperatur-Reaktors deutscher Konstruktion ist ein Haufen von einigen hunderttausend Graphitkugeln, die den Kernbrennstoff enthalten. An einem Glaskugel-Modell (nebenstehendes Bild) studiert man, ob in einer solchen Kugelhaufenschüttung sichergestellt ist, daß nach und nach alle Kugeln zu der unteren zentralen Kugelabzugsöffnung wandern.

Schmehausen, 10 Kilometer südöstlich von Hamm, gebaut wird und das einmal über eine elektrische Leistung von 300 MW verfügen soll.

Sicher und einfach bei hohen Temperaturen

Hochtemperatur-Reaktoren sind in ihrer Grundstruktur eine Weiterentwicklung der Natururan-Graphit-Reaktoren, wie sie erstmalig in Calder Hall zur Stromerzeugung eingesetzt wurden. Auch bei den Hochtemperatur-Reaktoren wird die Wärme durch ein Kühlgas nach außen geschafft, doch dieses Gas ist Helium und nicht Kohlensäure. Wegen der hohen Temperatur kann man im Core nicht mehr Metall einsetzen. Vielmehr nimmt man Graphit. Die Wände des Core-Raums bestehen aus Graphit und haben hier die Funktion eines Neutronen-Reflektors. Außerdem besteht die mechanische Struktur der Brennelemente aus Graphit. Dieses Graphit hat zugleich die Funktion, die Neutronen der Kernspaltungen zu moderieren. Als Kernbrennstoff wird beim Hochtemperatur-Reaktor natürlich nicht Natururan, sondern hochangereichertes Uran verwendet. Als Brutsubstanz mischt man Thorium unter den Kernbrennstoff. Aus dem nichtspaltbaren Thorium entsteht nämlich auch spaltbares Uran, nicht das in der Natur vorkommende U-235, sondern das etwas leichtere U-233. Die Weltvorräte an Thorium sind mindestens so groß wie die Uranvorkommen. Mit den Hochtemperatur-Reaktoren wird also ein ganz neues chemisches Element der Energienutzung erschlossen. Thorium-Hochtemperatur-Reaktoren, in Deutschland kurz THTR genannt, werden darum auch gelegentlich als thermische Brüter bezeichnet. Wahrscheinlich reicht es bei ihnen jedoch nicht ganz zum richtigen Brüten, also der ständigen Erzeugung von mindestens so viel neuem Kernbrennstoff, wie laufend verbraucht wird. THTRs sind aber mit Sicherheit hochgradige Konverter.

Damit ist bereits ein wichtiger, doch zur Zeit nicht so entscheidender Vorteil der Hochtemperatur-Kernkraftwerke genannt. Der andere ist der, daß die vom Reaktor gelieferte Wärme ein so großes Potential hat, also bei so hoher Temperatur anfällt. Beim THTR-Projekt Uentrop-Schmehausen wird das Helium im Reaktorkern auf 750 Grad Celsius aufgeheizt und liefert dann überhitzten Dampf von 530 Grad Celsius. Bei einer so hohen Dampftemperatur kann man es sich leisten, mit einem Kühlturm statt mit Flußwasserkühlung zu arbeiten. Man muß dem benachbarten Fluß, der Lippe, etwas Wasser zum Ausgleich der Verdampfungsverluste der Kühltürme entnehmen; der Fluß wird nicht aufgeheizt.

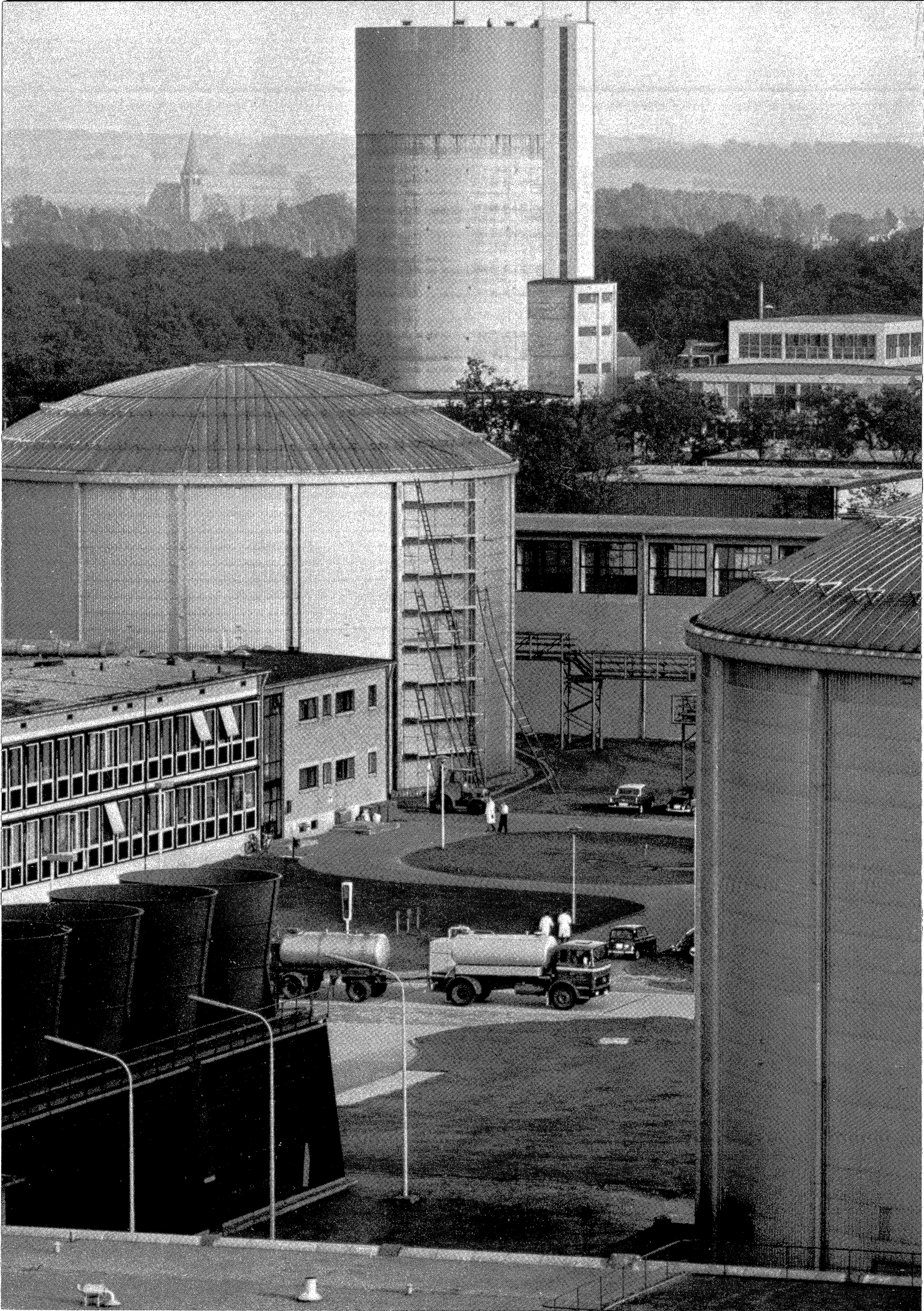
Das ist aber nur ein Anfang. Man wird bald die Kühlgastemperatur der THTRs auf 900 bis 1000 Grad Celsius steigern können, und dann ist es möglich, den Reaktorkühlkreislauf direkt mit einer Gasturbine zu koppeln. Man braucht dann also nicht mehr den zusätzlichen Dampfkreislauf, man kommt mit einem Kreislauf

aus. Und während beim Dampfturbinenprozeß der heute erreichte Wirkungsgrad durch höhere Temperaturen kaum noch zu verbessern ist, klettert er bei der Gasturbine noch munter weiter, bis auf maximal 42 bis 43 Prozent. Außerdem sollte die Vereinfachung der Kühlkreisläufe eine deutliche Senkung der Stromerzeugungskosten bringen, denn es entfällt nicht nur der Dampferzeuger, auch die Turbine und alle anderen Aggregate des einen Kreislaufs können wesentlich kompakter gebaut werden.

Da man dann ein noch höheres Temperaturgefälle nutzt, bietet die Gasturbine sogar die Möglichkeit der wirtschaftlichen Anwendung von sogenannten Trokkenkühltürmen zur Abwärmebeseitigung. Gegen die Kühltürme herkömmlicher Art kann man immer noch ins Feld führen, daß sie in der Umgebung die Luftfeuchtigkeit erhöhen. In ihrem Innern rieselt das Kühlwasser offen nach unten, und dabei verdampft natürlich etwas davon. Die Trockenkühltürme sind dagegen echte Wärmetauscher, durch die – wie beim Autokühler – zwangsweise Luft geblasen wird, ohne daß diese mit dem Kühlwasser in Kontakt käme. Gegen eine trockene Aufheizung der Luft aber kann man bei bestem Willen keine Umweltargumente mehr vorbringen. Ein so ausgerüstetes Kernkraftwerk verbraucht nicht einmal mehr Wasser.

Gasturbinen mit konventioneller Erhitzung, etwa unter Verwendung von Öl oder Erdgas, haben bereits in den letzten Jahren große Bedeutung für die Stromversorgung erlangt, nämlich zur kurzzeitigen Überbrückung von Versorgungsspitzen. Der Spitzenbedarf eines Stromversorgungsnetzes tritt ja nur während weniger Stunden eines Tages und während weniger Wochen eines Jahres auf. Dafür genügen also möglichst billige Kraftwerke, die nicht unbedingt für langen Dauerbetrieb geeignet sein müssen, eben Gasturbinenkraftwerke. Um solche Turbinen in Kühlkreisläufen großer Hochtemperatur-Reaktoren zu betreiben, muß man sie noch auf Dauerleistung züchten, und man braucht sie in wesentlich größeren Leistungseinheiten, als sie heute zur Verfügung stehen. An den Grundlagen dieser Entwicklung wird schon heute sehr intensiv in der Kernforschungsanlage Jülich gearbeitet.

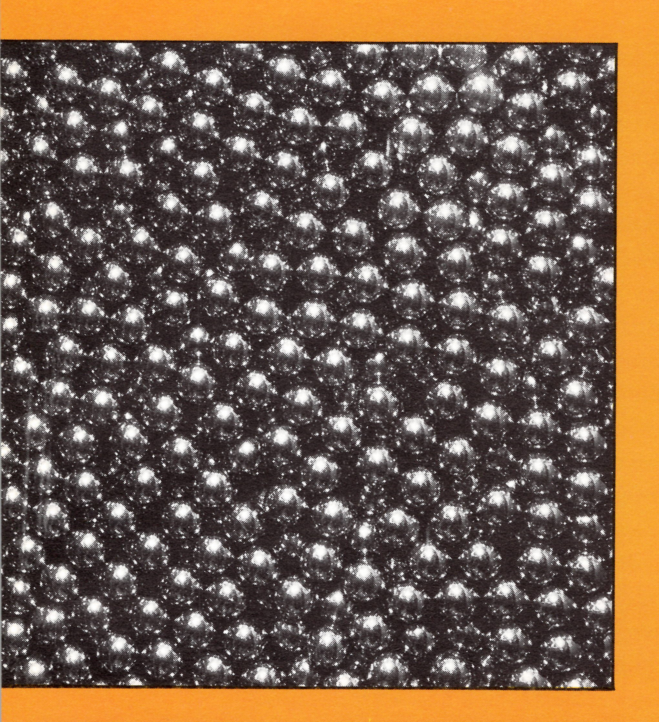
Schließlich bleibt noch zu erwähnen, daß Hochtemperatur-Reaktoren besonders sicher sind. In dem kleinen Hochtemperatur-Versuchskernkraftwerk, das unter der Bezeichnung AVR in unmittelbarer Nachbarschaft der Kernforschungsanlage Jülich seit 1967 mit einer elektrischen Leistung von 15 MW arbeitet und das die Entscheidungsgrundlagen für den großen THTR-Prototyp in Uentrop-Schmehausen geliefert hat, hat man mehrfach versuchsweise die Kühlgebläse abgeschaltet und ein Verklemmen der Abschaltstäbe simuliert. Es zeigte sich, daß die gerade bei Graphitreaktoren sehr große inhärente Sicherheit damit weitgehend fertig wird. Hochtemperatur-Reaktoren bieten auch die Möglichkeit, Reaktorwärme für chemische Prozesse zu benutzen.



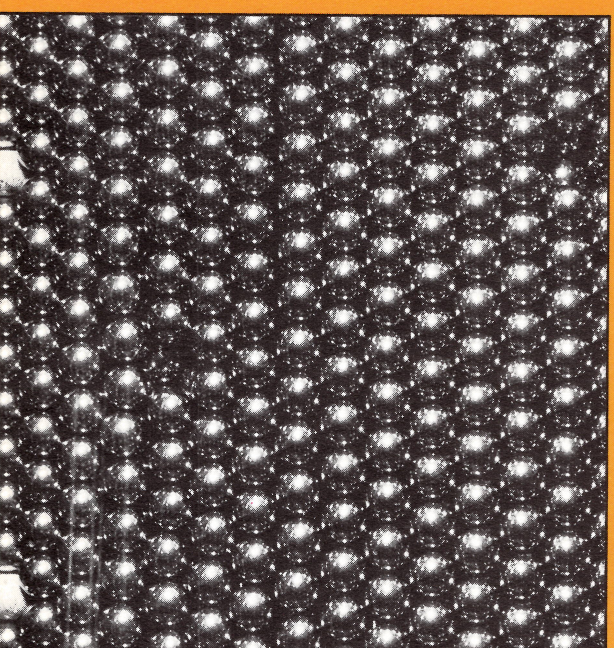
Das Core – ein Kugelhaufen

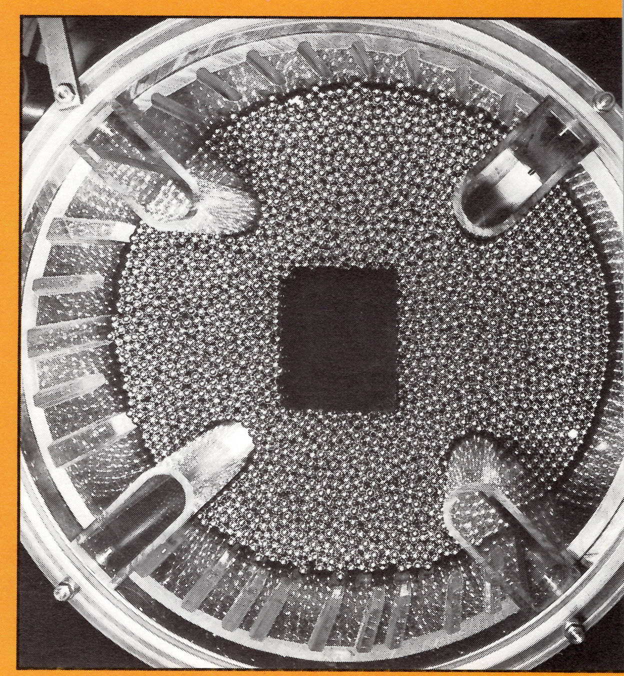
Gegenüber der Hochtemperatur-Reaktorentwicklung in den USA und in Großbritannien unterscheidet sich die in Deutschland in einem sehr wesentlichen Punkt, nämlich in der Form der Brennelemente, der Verpackung des Kernbrennstoffs. Das sind hier nicht Stäbe, sondern Kugeln. Die Brennelementladung des Demonstrations-Kernkraftwerks in Uentrop-Schmehausen besteht aus 675 000 brennstoffgefüllten Graphitkugeln von der Größe eines Tennisballs. Sie sind regellos – ohne Führung oder Halterung der einzelnen Brennelementkugel – aufeinandergeschüttet, bilden also in dem runden Reaktorgefäß einen Kugelhaufen von 6 Meter Höhe und 5,6 Meter Durchmesser. Das ist das Core.
Die einzelne Brennelementkugel hat einen Durchmesser von 6 Zentimetern und enthält den Kernbrennstoff in der Form kleiner Kügelchen von etwa 1 Millimeter Durchmesser, die wiederum recht geistreich konstruierte mehrschichtige Gebilde sind. Jedes Brennstoffkügelchen ist von einer doppelschichtigen Hülle aus Pyrokohlenstoff umgeben, die in der Lage ist, die im Kernbrennstoff entstehenden Spaltprodukte zuverlässig zurückzuhalten, selbst bei extrem hohen Temperaturen. Der Brennstoff selbst besteht aus hochangereichertem Uran und Thorium, gemischt im Verhältnis 1:10 und chemisch gebunden an Kohlenstoff. Er besteht also aus Karbiden. Die einzelne Brennelementkugel enthält knapp 1 Gramm Uran-235 und knapp 10 Gramm Thorium, außerdem 190 Gramm Kohlenstoff. Die Brennelementkugel hat eine äußere feste, etwa 5 Millimeter starke Graphitschale, die keine beschichteten Brennstoffkügelchen enthält und der Kugel ihre mechanische Festigkeit gibt. Im Innern dieser »Nußschale« lagern die beschichteten Brennstoffteilchen, gleichmäßig in Graphit verteilt, in einer sogenannten Graphitmatrix.
Nach außen sind das Core und das Reaktorgefäß von einem Druckbehälter aus Spannbeton umschlossen, dessen Wände zwischen 4 und etwa 5 Meter dick sind. Er ist für einen Prüfdruck von 47 Atmosphären ausgelegt, denn der Druck des Kühlgases, des Heliums, beträgt 40 Atmosphären. Es strömt von oben durch die Kugelhaufenschüttung, wird dabei auf 750 Grad Celsius aufgeheizt und gelangt dann in die sechs Dampferzeuger, die in den Spannbetondruckbehälter mit eingebaut sind. Sechs Gebläse sorgen für den Gasumlauf.
Die Kugelhaufenschüttung des Cores wird während des Betriebs langsam, aber

Drei Kernreaktoren auf einem Bild. Im Vordergrund die Forschungsreaktoren DIDO und MERLIN der Kernforschungsanlage Jülich, im Hintergrund das Hochtemperatur-Versuchskernkraftwerk (AVR), das seit 1967 arbeitet und bemerkenswert gute Betriebsergebnisse erbracht hat. Das Kugelhaufen-Konzept bestand hier seine Feuerprobe.



Wie die Teilchen einer Flüssigkeit bewegen sich die Brennelement-Kugeln des THTR-Reaktors normalerweise in idealer Unordnung frei zueinander (Bild links). Gefürchtet sind Kugelordnungen, die der Bildung von Kristallen entsprechen (Bild unten links), denn sie blockieren den Kugelumlauf. Unten rechts der Blick auf ein Core-Modell, wo im rechten Segment mehrere Kugelschichten »auskristallisiert« sind. In den anderen Segmenten haben die Wandrillen das verhindert.





stetig umgewälzt. Das Reaktorgefäß läuft unten in einen Trichter aus. Dort werden ständig Brennelementkugeln abgezogen und automatisch mechanisch überprüft und kernphysikalisch ausgemessen. Wenn der Brennstoffgehalt einer abgezogenen und ausgemessenen Kugel noch ausreicht, wird sie, mit Hilfe eines kleinen Computers sortiert, entsprechend ihrer Reaktivität von einer Förderanlage wieder oben auf die Kugelschüttung geworfen. Die Abschaltung des Reaktors erfolgt durch Stäbe von zylindrischem Querschnitt, die einfach mitten in den Kugelhaufen hineingeschoben werden. Bei Schnellabschaltung geschieht das mit einer Geschwindigkeit von 30 Zentimetern pro Sekunde.
Neben dieser Kugelhaufen-Entwicklungslinie gibt es in der Bundesrepublik Deutschland noch ein Projekt eines kleinen Hochtemperatur-Versuchskernkraftwerks von 22 MW für stabförmige Brennelemente und mit Einkreissystem, also bereits mit einer Heliumturbine im direkten Kreislauf. Der ursprünglich für dieses Projekt vereinbarte Festpreis von 66 Millionen DM erwies sich im Laufe der Entwicklung als entschieden zu niedrig, so daß der Bauvertrag zunächst wieder aufgelöst werden mußte. An der grundsätzlichen Durchführbarkeit dieses Vorhabens besteht jedoch nach wie vor kein Zweifel, und es erscheint auch weiterhin als interessant und wichtig, denn auf lange Sicht ist zur Zeit schwer zu unterscheiden, ob für Hochtemperatur-Reaktoren kugelförmige oder stabförmige Brennelemente am günstigsten sind. Nur eingehende Betriebserfahrungen können hier die Entscheidung bringen.
Es könnte auch sein, daß sich später einmal ein drittes Brennelementkonzept durchsetzt, wie es heute diskutiert wird. Das wäre die Verwendung der beschichteten Brennstoffteilchen ohne die Verpackung einer Kugel oder eines Stabs, also ein Core, das nur eine Schüttung beschichteter Teilchen ist. – Jedenfalls bietet die Hochtemperatur-Reaktorbaulinie noch ein weit gefächertes Potential weiterer Entwicklungsmöglichkeiten, für deren volle Ausschöpfung sicher noch Jahrzehnte benötigt werden. Dieses Entwicklungspotential wird den Hochtemperatur-Reaktoren in der kommenden Kernkraftwerksgeneration einen hervorragenden Platz sichern.

Zukunft durch Schnelle Brüter

Seit den Kindertagen der nichtmilitärischen Kernkraftentwicklung arbeitet man an einem Reaktorkonzept, das schon fast ein wenig an das berühmte Perpetuum mobile erinnert. Damit soll die im Natururan potentiell vorhandene Energie mindestens fünfzigmal besser genutzt werden, als das in den Kernkraftwerken der heutigen Generation möglich ist. Durch Verwirklichung des alten Traums der Alchimisten, ein chemisches Element in ein anderes umzuwandeln, sollen Reaktoren dieses Typs neuen Spaltstoff – Plutonium – aus nichtspaltbarem Uran-238

»ausbrüten«, und zwar in einem Umfang, bei dem nicht nur der laufende Spaltstoffbedarf gedeckt wird, sondern noch ein Überschuß zur Erstausstattung neuer Kernkraftwerke dieses Typs bleibt. Da bei solchen Reaktoren der Neutronenmoderator fehlt, sie also mit schnellen Neutronen arbeiten, bezeichnet man sie als Schnelle Brüter.

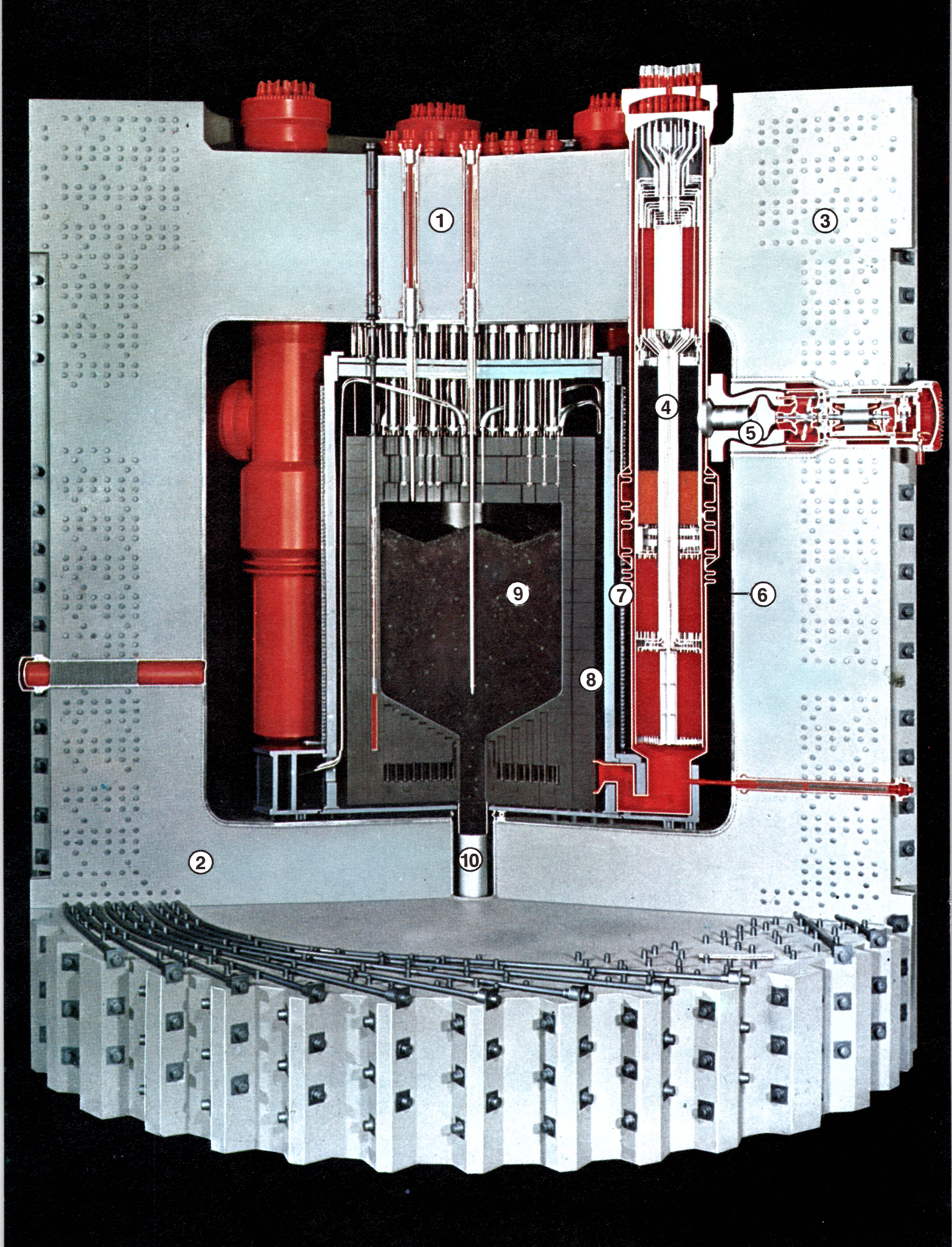
Bereits im Dezember 1951 wurde in den USA, in der Wüste von Idaho auf dem Reaktorversuchsgelände der amerikanischen Atomenergiekommission, ein kleines experimentelles Brüter-Kernkraftwerk in Betrieb gesetzt, der EBR I mit einer elektrischen Leistung von 200 Kilowatt. Das war damals überhaupt das erste Mal, daß aus Kernenergie Elektrizität erzeugt und versuchsweise in ein öffentliches Stromversorgungsnetz gespeist wurde. Aber nicht nur in den USA, auch in Großbritannien und vor allem in der Sowjetunion schenkte man der Brüterentwicklung von Anfang an viel Beachtung. Doch der erste Anlauf der fünfziger Jahre führte noch nicht zum Ziel, bei fast allen größeren Anlagen jener Zeit gab es erhebliche technische Schwierigkeiten, die zu langen Betriebsunterbrechungen führten. Die Hoffnung, auf dieser Basis einmal große, wirtschaftlich arbeitende Kernkraftwerke bauen zu können, schwand zunächst dahin.

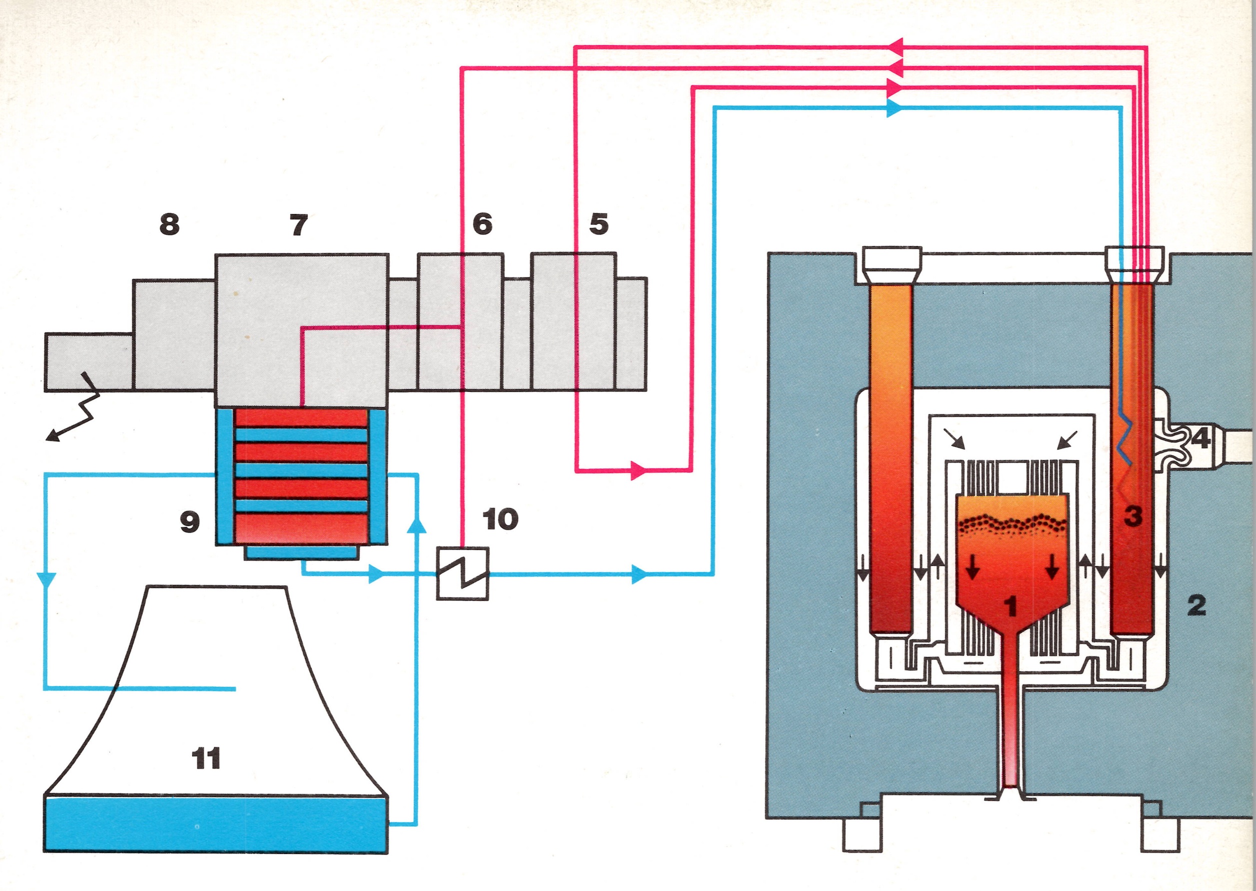
So bedurfte es neuer, grundlegender Erkenntnisse, um einen zweiten Entwicklungsanlauf zu rechtfertigen. Diese kamen gegen Ende der fünfziger Jahre mit der Entdeckung des internen Brütens. Man erkannte, daß die im Core ursprünglich sehr strenge Trennung zwischen der eigentlichen Reaktorzone und einer umgebenden Brutzone aufgelockert werden sollte. Man wollte dem Spaltstoff der inneren Reaktorzone bewußt Natururan beigeben, um bereits in den Brennelementen der inneren Zone das neu ausgebrütete Plutonium gleich wieder mit zu verwenden. Das sollte zu einem extrem hohen Abbrand der Brennelemente, zu einer extrem guten Ausnutzung des Brennstoffs und entsprechend günstigen Stromerzeugungspreisen führen. Trotz Übergang zu Oxidbrennstoff war bei so hohem Abbrand mit der mechanischen Zerstörung der Brennstofftabletten im Brennelement zu rechnen, doch die inhärente Sicherheit des Cores sollte – auch das war eine neue Erkenntnis – durch den sogenannten Dopplereffekt erreicht werden. Damit wurden Brüter-Kernkraftwerke erneut interessant.

Nun stießen auch Frankreich und die Bundesrepublik zum Kreis der Brüterentwickler, der dann später, gegen Ende der sechziger Jahre, durch weitere in der Kerntechnik aktive Länder, vor allem auch durch Japan, erweitert wurde.

Es ist heute so offenkundig, daß die Brüter auf längere Sicht die absolut notwendige Ergänzung zur heutigen Generation der Leichtwasser-Kernkraftwerke sind, daß man auf sie einfach nicht verzichten kann. Sie können bei hoher Energieentfaltung bequem von den »Brotkrumen« leben, die »vom Tisch« der Leichtwasser-Kernkraftwerke fallen. Sie können lange von den riesigen U-238-Vorräten zehren, die heute in den Kernbrennstoff-Anreicherungsanlagen als Abfall

übrigbleiben und deren Lagerhaltung einiges Geld kostet. Wenn dieses abgereicherte, also vom spaltbaren Anteil weitgehend befreite Natururan eines Tages aufgezehrt sein wird, kann man den Brüter-Kernkraftwerken die Uranvorkommen geringer Konzentration »zum Fraß« vorwerfen. Da ihr Brennstoffverbrauch so wesentlich geringer ist, macht es nichts, wenn die Erschließung des von ihnen verwendeten Urans erheblich teurer wird. Das bedeutet eine zusätzliche Stabilisierung der Stromerzeugungspreise und der Energieversorgungssicherheit.
Wir schauen heute voll Bewunderung auf die riesigen Blockgrößen der Leichtwasser-Kernkraftwerke. Im Zeitalter von Kohle und Erdöl konnte man nicht an 1200-MW-Einheiten denken, das wäre technisch und ökonomisch sinnlos gewesen. Doch jetzt befindet man sich bei den herkömmlichen Kernkraftwerken auch bereits wieder in einem Bereich, wo eine weitere Größensteigerung nicht mehr eine weitere Kostensenkung bringt. Für Brüter gilt das nicht. Bei ihnen kann die Blockgröße noch einmal erheblich – also auf einige 1000 MW – gesteigert werden und zu einer weiteren Senkung der spezifischen Kosten führen. So steigern die Brüter die Vorteile der herkömmlichen Kernkraftwerke noch einmal um eine ganze Stufe. Die Brüter bringen auch endlich die Unabhängigkeit von Uran-Anreicherungsanlagen, die man sich ursprünglich einmal von der unmittelbaren Verwendung des Natururans versprach. Weiterhin wird man in den Brütern das derzeit in den Wasserreaktoren schon in kleinerem Umfang anfallende Plutonium in besonders ökonomischer Weise ausnutzen können. Wegen ihrer höheren Arbeitstemperatur ist auch bei den Brütern die Wärmeabgabe an die Umgebung – ähnlich wie bei den Hochtemperatur-Reaktoren – geringer.
Alle diese Vorteile bekommt man jedoch nicht geschenkt. Man muß sie mit zusätzlichen Schwierigkeiten und Problemen bezahlen. Vor allem durch wesentlich höhere Anforderungen an das Core und an das Kühlsystem. Brüter-Cores hält man frei von moderierenden Substanzen, denn sie bremsen nicht nur die Neutronen ab, sie schlucken auch viele Neutronen. Die freien Neutronen braucht man aber in einem Brüter restlos, um einerseits die Kernspaltungskettenreaktionen nicht erlöschen zu lassen und um andererseits die Umwandlung des nicht spaltbaren Urans (U-238) in Plutonium (Pu-239) einzuleiten, also um brüten zu können. Aus dem gleichen Grund muß im Core die Spaltstoff-Konzentration groß und der Anteil aller anderen Stoffe - einschließlich Kühlmittel – klein sein. So kommt man bei den Brütern zu der Forderung, in einem kleinen Core-Volumen große Wärmemengen zu erzeugen. Die thermische Leistung von 1 Liter Core-Volumen erreicht hier 400 Kilowatt. Diese Wärme will abgeführt sein. Außerdem geben die schnellen Neutronen dem Reaktor ein anderes dynamisches Verhalten und werden nicht so schnell absorbiert. Das will man im Interesse einer günstigen Brutrate, doch das erschwert die Reaktorregelung, weil die neutronenabsorbierenden Kontroll- und Regelstäbe bei schnellen Neutronen schwächer wirken.


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



Prinzip-Schaltbild des THTR-Kernkraftwerks Uentrop-Schmehausen. Die dampferzeugenden Wärmetauscher sind rechts und links vom Reaktor-Core in den Spannbeton-Druckbehälter eingebaut. Hier kann man wieder wie bei konventionellen Kohle- und Ölkraftwerken mit überhitztem Dampf und Zwischenüberhitzung arbeiten. Außerdem kommt man ohne Flußwasserkühlung aus und verwendet Kühltürme. Der primäre Helium-Kühlkreislauf verläuft ausschließlich innerhalb des dickwandigen Betonbehälters und wird durch Gebläse in Gang gehalten. – Links Modell des aufgeschnittenen Reaktor-Druckbehälters. Man erkennt die meterdicken Betonwände und die Verschraubung der Stahlarmierung.

Oben: 1 Core 2 Spannbetonbehälter 3 Dampferzeuger 4 Kühlgasgebläse 5 Hochdruckteil der Turbine 6 Mitteldruckteil der Turbine 7 Niederdruckteil der Turbine 8 Generator 9 Kondensator 10 Vorwärmer 11 Kühlturm
Links: 1 Abschaltstab 2 Spannbetonbehälter 3 Ringförmige Spannglieder 4 Dampferzeuger 5 Gebläse 6 Wärmedämmung 7 Thermischer Schild 8 Seitenreflektor 9 Core 10 Kugelabzugsrohr

Die hohe Energiedichte eines Brüter-Cores verlangt ein besonders leistungsfähiges Kühlmittel wie etwa flüssiges Metall, flüssiges Natrium. Es nimmt viel Wärme mit sich und muß nicht wie Wasser bei der Arbeitstemperatur des Reaktors – so um die 650 Grad Celsius herum – unter Druck gesetzt werden, um ein Sieden zu verhindern. Natrium siedet erst bei 889 Grad. Andererseits ist Natrium bei Zimmertemperatur fest, es schmilzt erst bei 97 Grad, also bei einer Temperatur, bei der Wasser schon fast siedet. Außerdem ist Natrium ein chemisch nicht ganz problemloses Material, da es bereits mit der Feuchtigkeit der Luft und jeder Art von Wasser heftig reagiert. Es erfordert zusätzliche Schutzmaßnahmen.
Schließlich wird das Natrium im Reaktor-Core unter intensiver Neutronen-Bestrahlung stark radioaktiv. Darum hat man in allen Brüter-Kraftwerken drei hintereinanderliegende Kühlkreisläufe, nämlich einen primären Kreislauf, dessen Natrium durch das Core strömt und radioaktiv wird, einen sekundären Kreislauf, dessen Natrium die Wärme von einem Wärmetauscher übernimmt und in einem Dampferzeuger an den dritten Kreislauf abgibt. Das ist der Dampfkreislauf der Turbine. Bei einem direkten Kontakt von Natrium und Wasser im zweiten Wärmetauscher kann es dann nicht zur Freisetzung radioaktiver Aerosole kommen, denn das Natrium des sekundären Kreislaufs ist nicht radioaktiv. Natürlich möchte man den zweiten, nicht unerheblich zu den Baukosten eines Brüter-Kernkraftwerks beitragenden Natriumkreislauf auf die Dauer einsparen. Entsprechende Entwicklungen sind im Gang.
Die eigentlichen technischen Probleme der Brüterentwicklung sind damit aber nur grob umrissen, sie liegen tiefer. Sie betreffen zum Beispiel die Frage, was geschieht, wenn sich im Core Natriumdampfblasen bilden oder sonstwie lokal die Wärmeabfuhr stockt. Sie betreffen das Verhalten der Edelstahlhüllrohre, die den Kernbrennstoff im Brennelement umschließen. Sie sind bei hoher Temperatur einem sehr intensiven Neutronen-Strom ausgesetzt, stehen von innen her unter dem Druck der Spaltgase und sind nach außen hin der Korrosion durch das Natrium ausgesetzt. Bei der hohen Ausnutzung des Kernbrennstoffs wird die mechanische Struktur der Brennstofftabletten zerstört, und die Hüllrohre können sich nicht auf diese Tabletten abstützen. Mehr als ein Dutzend solcher Probleme nennen die Brüter-Forschungsberichte des Karlsruher Kernforschungszentrums. Viele weitere Detailfragen kommen dazu. Kurz und gut, es gibt hier noch einiges zu tun.

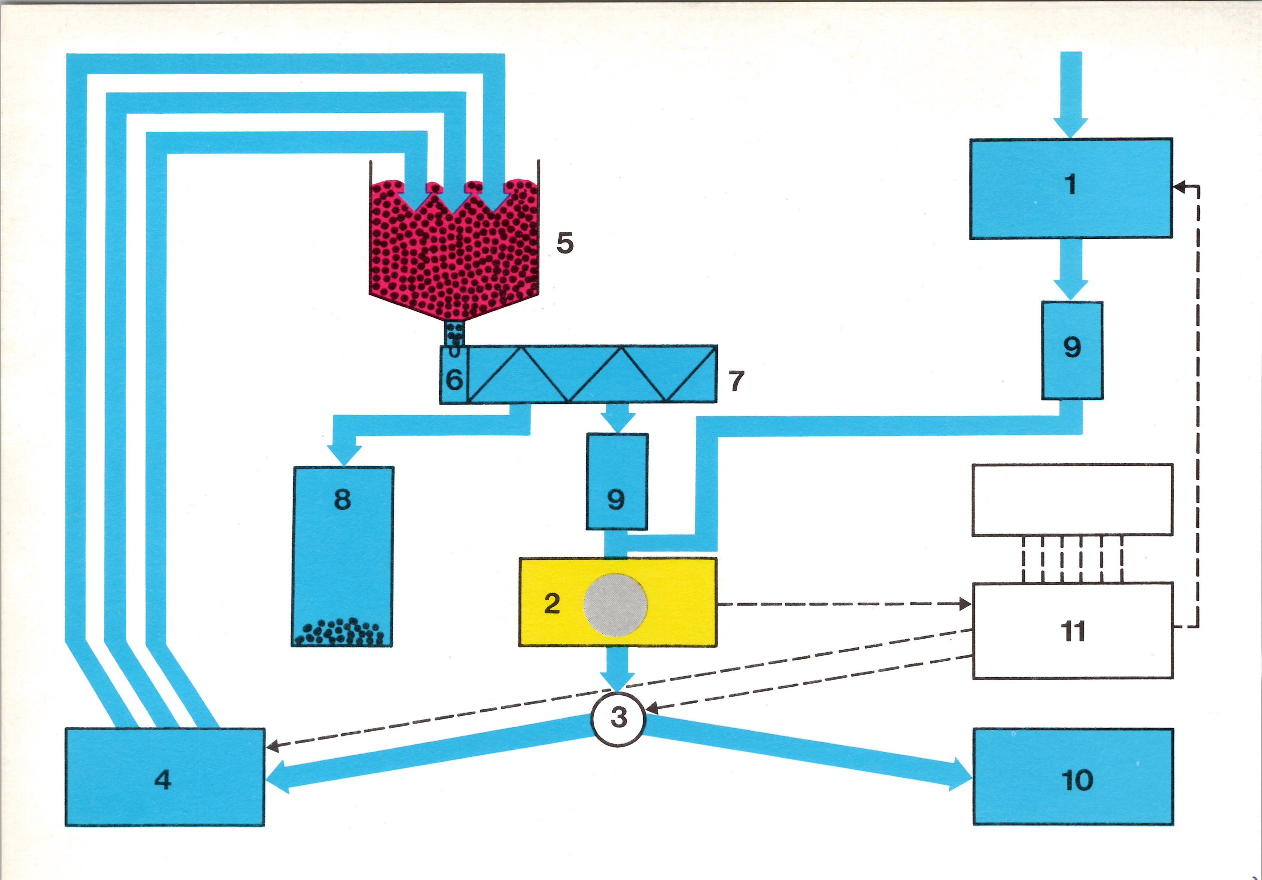
SNR 300 – ein europäisches Gemeinschaftsprojekt

Die Brüterentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland setzte etwa 1960 ein. Im Karlsruher Kernforschungszentrum waren damals die Entwicklungsarbeiten für den FR 2 so weit gediehen, daß man sich einer neuen großen, zentralen

Aufgabe zuwenden konnte, eben der Entwicklung eines Schnellen Brüters. Fast alle großen Institute des Karlsruher Zentrums wurden nach und nach in die Arbeiten des »Projekt Schneller Brüter« mit einbezogen, und ein 1963 geschlossener Assoziationsvertrag mit der Europäischen Atomgemeinschaft (Euratom) stellte diese Arbeiten in einen größeren europäischen Rahmen. Bis 1967 wollte man durch reaktorphysikalische, technische und technologische Grundlagenuntersuchungen die Bestimmungsstücke für einen dann zu bauenden Prototyp-Leistungsreaktor gewinnen.

Bereits Ende 1966 hatten die Arbeiten in Karlsruhe einen Stand erreicht, bei dem die Industrie aktiv mit eingeschaltet werden konnte. Sie erhielt den Auftrag zur Planung von zwei großen Prototyp-Brüterkraftwerken mit einer elektrischen Leistung von je 300 MW. Die Benelux-Länder beteiligten sich mit ihren staatlichen Zentren und ihrer Industrie an dem deutschen Projekt mit etwa 30 Prozent. Daraus ging schließlich ein Bauangebot hervor, das ein Konsortium deutscher, belgischer und holländischer Reaktorbaufirmen Ende 1969 abgab. Ein darauf fußender Bauauftrag wird für Ende 1971 erwartet, so daß der SNR-300 – unter dieser Kurzbezeichnung läuft jetzt dieses Prototypprojekt – etwa 1977 den Probebetrieb aufnehmen könnte. Gegenüber den in Größe und Aufgabenstellung sehr ähnlichen Prototypanlagen Großbritanniens (PFR in Dounreay/Schottland) und Frankreichs (PHENIX in Cadarache/Provence) ist das etwas spät. Gegenüber den USA, wo die Enttäuschung über die Schwierigkeiten mit den ersten Brüterkonzepten besonders groß war, besteht etwa Gleichheit der Termine.

In der Tat ist das deutsche Brüterprojekt in den letzten Jahren, wie es bei so avantgardistischen Vorhaben passiert, etwas in Verzug geraten. Es mußte ein neuer Standort für den SNR-300 in der Nähe von Kleve am Niederrhein gefunden werden. Es gab Verzögerungen bei der Inbetriebnahme eines größeren, mit Natriumkühlung arbeitenden Versuchsreaktors in Karlsruhe, auf dessen Betriebserfahrungen man beim Detailentwurf des SNR-300 nicht verzichten wollte. Schließlich wünschte das Konsortium der deutsch-holländisch-belgischen Energieversorgungsunternehmen, das einmal das Prototyp-Kernkraftwerk betreiben soll, Änderungen am Reaktorgebäude. Dieses wird nicht mehr die sonst übliche kugelzylindrische Form haben, sondern ein eckiger Betonbau sein, wie man ihn auch später bei den großen Brüter-Kernkraftwerken haben dürfte. Angesichts der Langfristigkeit der Brüterentwicklung spielt jedoch diese Verzögerung sicher nur eine sehr untergeordnete Rolle. Es ist ohnehin abzusehen, daß die ersten großen Demonstrationsbrüter, die eine elektrische Leistung von mindestens 1000 MW haben werden, in Europa auf internationaler Basis, also von großen und kleineren europäischen Ländern gemeinsam, entwickelt und gebaut werden müssen. Bei einem so aufwendigen und schwierigen Unternehmen wäre es kurzsichtig, die bisherigen Erfahrungen nicht gemeinsam nützen zu wollen.

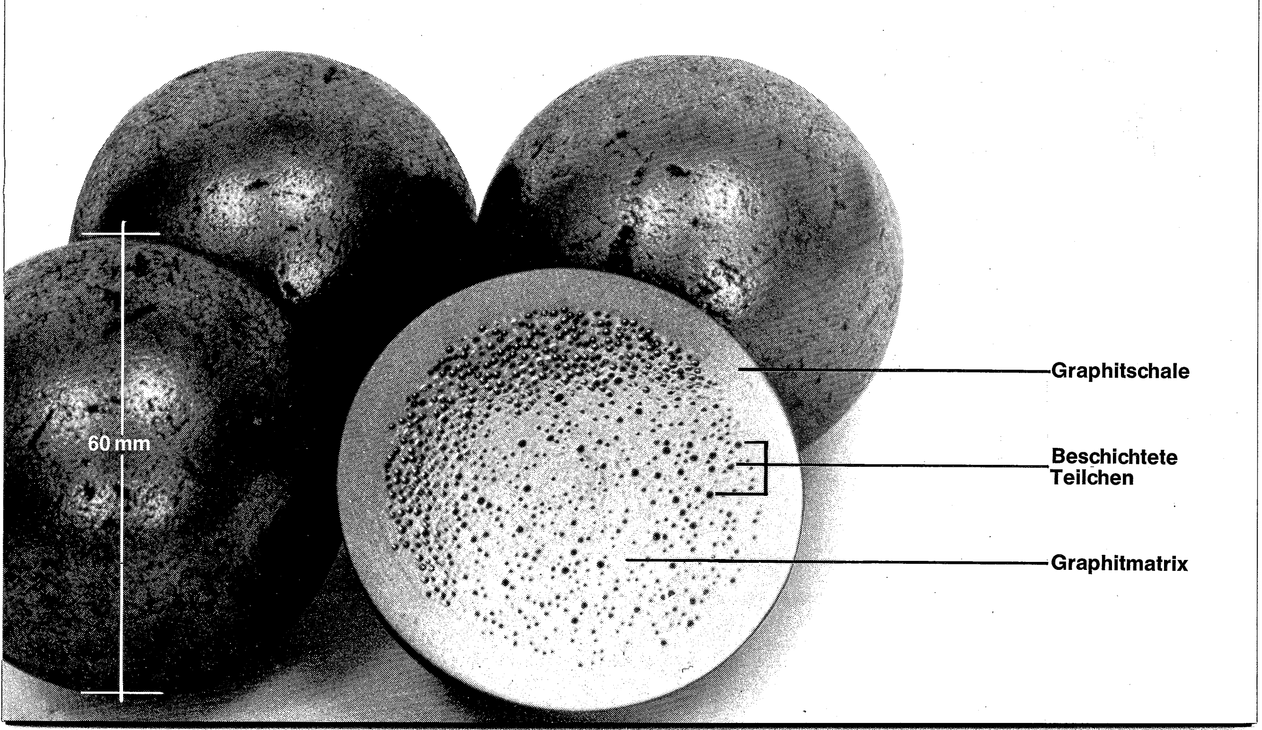


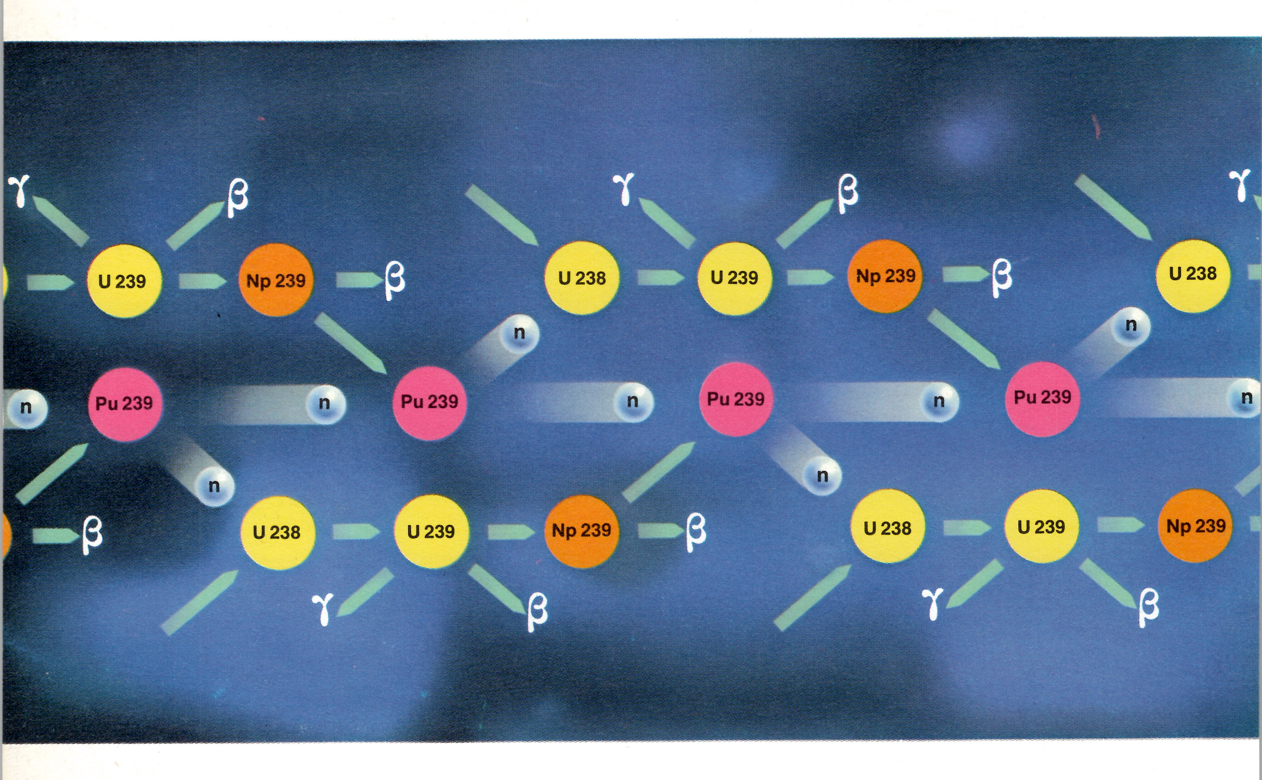
In der Bundesrepublik, wo für Vielfalt immer großer Spielraum war, wurde Ende der sechziger Jahre im Rahmen des Brüterprojekts noch eine zweite Prototyp-Baulinie verfolgt. Es handelte sich dabei um ein Reaktorkonzept mit Dampfkühlung, eine bei oberflächlicher Betrachtung in ihrer Einfachheit zweifellos bestechende Variante. – Statt der drei Kühlkreisläufe der Natriumlinie gibt es hier nur einen einzigen Dampfkreislauf für Kühlung und Turbinenantrieb. Mächtige Gebläse drücken trockenen Dampf unter hohem Druck durch das Core, so daß er noch weiter aufgeheizt wird. Ein Teil dieses überhitzten Dampfs geht auf die Turbinen, der andere wird dazu benutzt, in sogenannten Löffler-Kesseln neuen Dampf für die Kühlung zu erzeugen.
Da es sich hierbei im Grunde genommen um die Weiterführung der herkömmlichen Siedewasser-Reaktortechnik handelt, für die in der Bundesrepublik ein spezieller Reaktor mit Dampfüberhitzung im Reaktorkern entwickelt worden ist, schien die Brüter-Dampfkühlung zunächst nur verhältnismäßig geringen Aufwand zu erfordern. Bei näherer Beschäftigung mit dieser Baulinie stieß man jedoch auf Materialprobleme grundsätzlicher Natur, die erhebliche zusätzliche Kosten und eine erhebliche Verzögerung mit sich gebracht hätten. So wird die Brüter-Dampfkühlung heute im Karlsruher Kernforschungszentrum nur noch sehr

Ein geistreiches System sorgt dafür, daß die Brennelementkugeln des THTR-Reaktors laufend umgewälzt werden. Jedes unten abgezogene Kugelelement wird in einer Abbrand-Meßanlage, die im Prinzip ein kleiner Kernreaktor ist, daraufhin untersucht, wieweit es noch spaltbares Uran enthält und sich ein erneuter Einsatz im Core lohnt. Je nach Spaltstoffgehalt werden die noch für brauchbar befundenen Kugeln im Zentrum oder in Randzonen auf den Kugelhaufen geworfen. Ein kleiner Computer steuert das alles.

Links: 1 Kugelzugabeeinrichtung 2 Unterscheidungs- und Abbrandmeßanlage 3 Weiche 4 Höhenförderer 5 Core 6 Vereinzelner 7 Schrottabscheider 8 Schrottbehälter 9 Pufferstrecke 10 Kugelentnahmeeinrichtung 11 Prozeßrechner

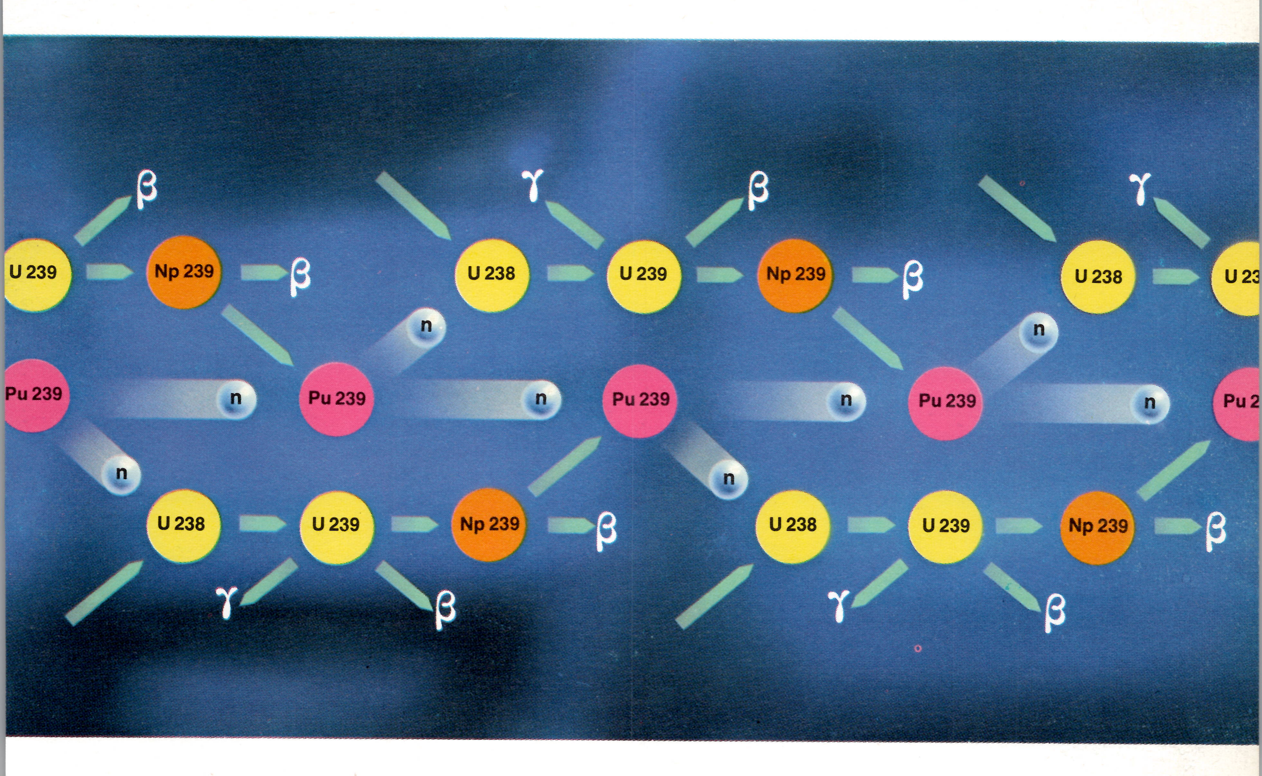
Unten: Brennelementkugeln des THTR-Reaktors, eine davon aufgeschnitten. Die schwarzen Pünktchen im inneren Bereich sind die beschichteten Brennstoffteilchen. Die äußere brennstofffreie Graphitschale gibt der Kugel eine enorme mechanische Festigkeit. Selbst bei einem Fall aus mehreren Metern Höhe zerspringen die Kugeln nicht.





schmalspurig weiterbetrieben, mit einem Aufwand von etwa 5 Millionen DM pro Jahr.

Mehr Interesse findet heute in der Bundesrepublik die Kühlung von Schnellbrütern mit Helium, also mit Gas. Auch dabei kann man in großem Umfang auf bekannte Techniken zurückgreifen, und es erscheint möglich, die Brennstoffvorteile der Brüter und die Kühlkreislaufvorteile der Hochtemperatur-Reaktoren zusammenzufassen. Ein in der Bundesrepublik ausgearbeitetes, im Frühjahr 1971 veröffentlichtes, Memorandum schlägt vor, von den drei möglichen Varianten eines gasgekühlten Schnellen Brutreaktors die konventionellste, bei der noch eine Dampfturbine und Oxidbrennstoffe vorgesehen sind, schon jetzt in einer Entwurfsstudie genauer zu untersuchen, um über deren Sicherheitsprobleme und Kosten verbindliche Unterlagen zu erhalten. Dieses Konzept verspricht niedrige Stromkosten, geringe Entwicklungsprobleme, gute Sicherheitsaspekte wegen der geringen Wechselwirkung zwischen Neutronen und Kühlmittel und schließlich eine gute Einarbeitung in noch fortschrittlichere Varianten. Welches Echo dieses Memorandum finden wird, ist im Augenblick noch offen. Mit dem Durchbruch der natriumgekühlten Brüter, wie man ihn für die Mitte der achtziger Jahre erwartet, wird die Brüterentwicklung jedenfalls nicht abgeschlossen sein. Durch die Ver-



Oben: Brutprozesse (obere und untere Reihe), kombiniert mit einer Folge von Kernspaltungs-Kettenreaktionen (mittlere Reihe). Aus U-238 wird Pu-239 erbrütet und dann gespalten.

Unten: Der Brutprozeß ist nicht nur darum interessant, weil das nichtspaltbare Uran genutzt werden kann. Er macht die Stromerzeugungskosten der Kernkraftwerke unabhängig von Anreicherungskosten und Urankosten, die bei den heutigen Kernkraftwerken etwa je ein Drittel ausmachen. Das bedeutet noch nicht, daß die in einem Brüter-Kernkraftwerk erzeugte Kilowattstunde nur ein Drittel kostet, dafür kommt der Aufwand des Brütens dazu. Doch da es sich dabei im wesentlichen um zusätzliche Investitionskosten handelt, kann man diesen Kostenanteil im Griff behalten. Man ist damit nicht den Schwankungen auf dem Weltmarkt ausgesetzt.

	Uranerz- und Verarbeitung zu UO_2	Anreicherung des spaltbaren U 235	Verarbeitung zu Brennstoffelementen
Brennstoffkosten bei Leichtwasser-Reaktoren	1/3	1/3	1/3
Brennstoffkosten bei Plutonium-Brütern	vernachlässigbar	entfällt	1/3



Die Handhabung von Plutonium kann nur in sogenannten Handschuhkästen erfolgen. Plutonium ist extrem giftig und darf nicht mit der Außenwelt in Kontakt kommen. Durch die Handschuhe wird die Trennung aufrechterhalten, ohne daß der mit Plutonium hantierende Mensch in seiner Arbeitsfähigkeit allzusehr eingeschränkt ist. Unmittelbare Strahlengefahr besteht für die Hände nicht, sonst müßte man mit fernbedienten Greifarmen arbeiten, sogenannten Manipulatoren.

wendung von Hochleistungsbrennstoffen in der chemischen Form von Karbiden oder Nitriden sind – in Verbindung mit der Gaskühlung – Weiterentwicklungen denkbar, die bei den späteren Brüter-Kernkraftwerken zu interessanten Varianten führen werden.

Ein zweites, sehr in die Zukunft gerichtetes deutsches Brüterprojekt zielt auf die Entwicklung eines Schnellen Hochfluß-Testreaktors, der für die künftige breitgefächerte Brüterentwicklung einmal eine ähnliche Rolle spielen könnte, wie sie seinerzeit die amerikanischen Materialprüfreaktoren für die heutigen Leichtwasser-Kernkraftwerke gespielt haben. Dieser im Karlsruher Kernforschungszentrum konzipierte FR 3 soll in seiner ersten Ausbaustufe bei einer thermischen Leistung

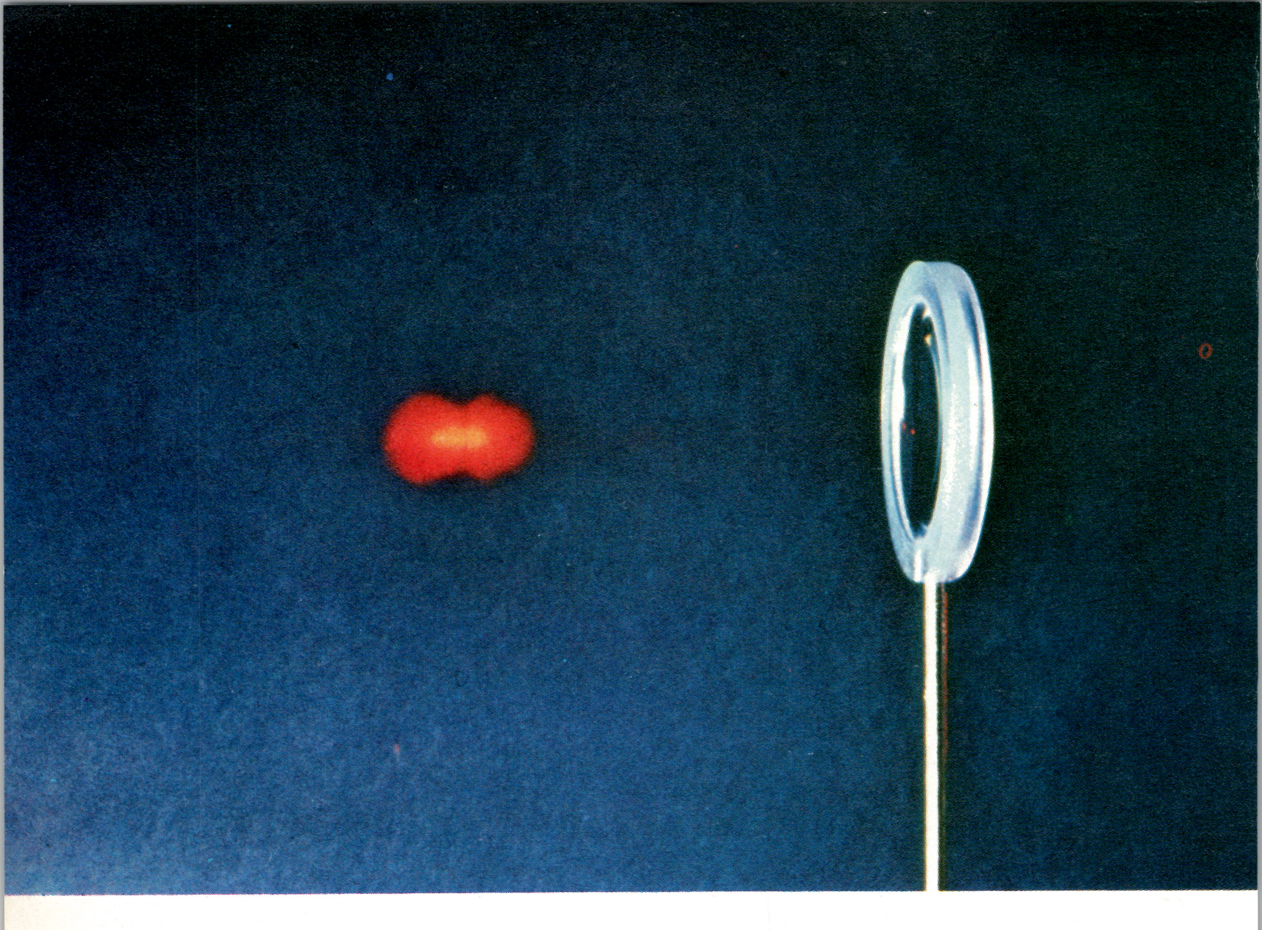
von knapp 500 MW einen schnellen Neutronenfluß von 10^{16} Neutronen pro Sekunde und Quadratzentimeter haben. Später kann dieser Fluß durch die Verwendung von Hochleistungsbrennstoffen und eine weitere Leistungssteigerung noch um 50 Prozent gesteigert werden. Die Aufgabenstellung des FR 3 soll die Optimierung von Brennelementen großer Brüterkraftwerke nach der Prototypphase sein. In den Versuchskreisläufen des Reaktors soll man auch Brennelemente für gasgekühlte Brüter oder, wenn das wieder interessant werden sollte, für dampfgekühlte Brüter testen können. Die Durchführbarkeitsstudie dieses Projekts wurde Ende 1970 zufriedenstellend abgeschlossen.

Fernziel Fusions-Kernkraftwerk

Noch vor wenigen Jahren galt es als vermessen, die kontrollierte Kernfusion als Möglichkeit der künftigen Energieversorgung ernsthaft ins Auge zu fassen. Die Plasmaphysik, die Erforschung der physikalischen Vorgänge bei sehr hoher Temperatur, wurde vor allem damit begründet, daß man über den Plasmazustand – den »vierten Aggregatzustand« – mehr wissen müsse, weil sich schätzungsweise 99 Prozent der Materie des Weltalls im Innern der Sterne und damit in dieser Form befände. Doch, ob im britischen Zentrum Culham oder im Moskauer Kurchatov-Institut, ob bei der amerikanischen Stellarator-Gruppe in Princeton oder in Deutschland im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München und in der Kernforschungsanlage in Jülich, die Hoffnung auf die »Zähmung der Wasserstoffbombe«, die friedliche Nutzung der Kernfusion, stand bis gegen Ende der sechziger Jahre nur ganz im Hintergrund.

Nun kam es aber mit Beginn der siebziger Jahre aufgrund neuer Forschungsergebnisse zu einem so deutlichen Umschwung in der Beurteilung der Kernfusionszukunft, daß heute bereits vereinzelt die unrealistische Forderung erhoben wird, in die Entwicklung der Kernspaltungs-Kraftwerke, insbesondere der Schnellen Brüter, nicht mehr so viel Geld zu stecken und statt dessen die Entwicklung der Fusionsreaktoren abzuwarten. Schon gibt es in den genannten Zentren größere Arbeitsgruppen, die sich sehr konkret mit der Technik künftiger Fusionsreaktoren und Fusions-Kernkraftwerke befassen. Nachdem die physikalischen Probleme heute als lösbar erscheinen, erkennt man, daß die Entwicklung von Fusions-Leistungsreaktoren vor allem ein technisches Problem sein wird, das gar nicht früh genug angepackt werden kann. – Aber wie könnten sie aussehen?

Mit Sicherheit wird das Herzstück der künftigen Fusionsreaktoren ein Vakuumgefäß sein, das die Form eines in sich geschlossenen Rohrs, eines Torus, hat. Die Kernverschmelzungsprozesse werden stattfinden in einem Plasmaring, der das Zentrum dieses in sich geschlossenen Rohrs ausfüllt und den ein kräftiges äußeres



Auch Luft wird durch Energiezufuhr zu einem Plasma. Ein von rechts kommender unsichtbarer Laserstrahl wird durch die Linse auf einen Punkt konzentriert. Er erhitzt hier mit seiner Lichtenergie die Luft. Die heißen Luftmoleküle zerfallen, und die mit elektrischen Ladungen versehenen Bruchstücke werden zum Leuchten angeregt. Sie lassen sich aber auch durch Magnetfelder führen und konzentrieren.

Magnetfeld hält. Ein Plasma ist nach der Definition der Physiker ein heißes Gas, dessen Atome aufgrund der hohen Temperatur in ihre Grundbestandteile, in Elektronen und den Atomkern, zerfallen sind. Da diese Grundbestandteile elektrische Ladung tragen, unterliegen sie dem Einfluß von Magnetfeldern, und man kann sie durch entsprechend geformte Magnetfelder von den Wänden des Vakuumgefäßes fernhalten. Trotzdem sind vor allem diese Wände das große technologische Problem der künftigen Fusionsreaktoren.
Das ringförmige Vakuumrohr wird von einem Flüssigkeitsmantel umgeben sein, der drei Funktionen zu erfüllen hat. Er soll das durch die Strahlung des Plasmas aufgeheizte Vakuumrohr kühlen. In diesem Mantel finden Kernprozesse statt, die

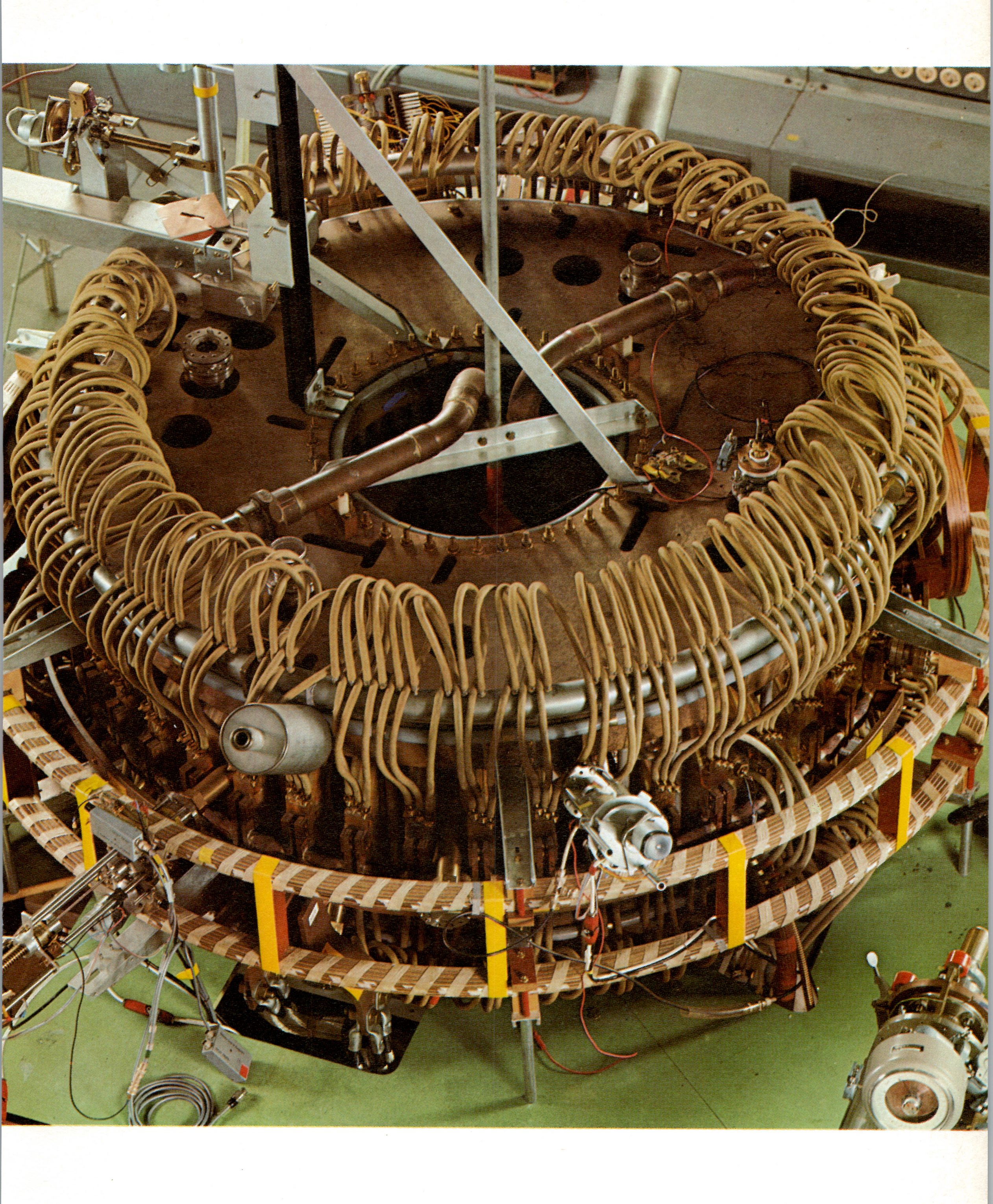
ausgelöst werden durch die Neutronen des Plasmas und die einen wesentlichen Teil der nutzbaren Energie des Reaktors liefern. Schließlich wird in diesem Mantel neuer Kernverschmelzungsbrennstoff ausgebrütet.
Diesen ersten, das torusförmige Vakuumrohr umschließenden Mantel umgibt eine zweite Schicht, die aus Graphit oder borhaltigem Wasser bestehen könnte. Sie soll die Neutronen absorbieren, die über den ersten Mantel hinausgelangen. Dann folgt nach außen als nächste Schicht eine thermische Isolierung, denn nun folgen als vierte Schicht die supraleitenden Spulen, deren Magnetfeld das Plasma hält. Wenn nicht eines Tages noch günstigere supraleitende Werkstoffe gefunden werden, haben diese Spulen eine Temperatur von etwa vier Grad Kelvin, also etwa —270 Grad Celsius. Das Plasma wird dagegen etwa 200 Millionen Grad heiß sein. Auf engstem Raum besteht hier also ein Temperaturgefälle wie sonst nirgendwo in der Natur oder in der Technik.
Die Kernverschmelzungsreaktionen im Plasma finden zwischen Atomkernen der beiden Wasserstoff-Isotope Deuterium und Tritium statt. Ein in seiner Größe für künftige Fusions-Kernkraftwerke typischer Reaktor von 5000 MW thermischer Leistung – sie entspricht einer elektrischen Leistung von etwa 2000 MW – verbraucht pro Tag etwa 14 Kilogramm Deuterium und 21 Kilogramm Tritium. Das Deuterium läßt sich verhältnismäßig billig aus dem Schwerwasseranteil des in der Natur vorhandenen normalen Wassers gewinnen. Das seltene Tritium muß dagegen künstlich aus Lithium mit Hilfe von Neutronen der Verschmelzungsreaktionen erbrütet werden. Die im Plasma freigesetzten schnellen Neutronen lösen im Lithiumkühlmantel einen exothermen Kernprozeß aus, bei dem Helium- und Tritium-Atomkerne entstehen. Durch eine zusätzliche Berylliumschicht zwischen dem flüssigen Lithium und der Wand des Vakuumgefäßes läßt sich die Neutronenausbeute wesentlich steigern, so daß ein Tritium-Brutfaktor von 1,3 bis 1,5 zu erreichen ist. Die Tritium-Erstausstattung eines Fusionsreaktors wird also sicher kein Problem sein. Das flüssige Lithium wird man möglicherweise mit Natrium vermischen, um seine Kühleigenschaften zu verbessern. Zur Abführung der Wärme kann man entweder in den Lithium-Natrium-Mantel Kühlschlangen einbauen oder man kann jeweils einen Teil des flüssigen Kühlmittels nach außen führen und ihm dort die Wärme entziehen. Es muß ohnehin laufend gereinigt werden, um den neu ausgebrüteten Kernbrennstoff, das Tritium, und das Abfallprodukt, normales Helium-4, abzuscheiden.
Problematischer ist die Reinigung und Versorgung des Plasmas. Wenn ein solcher Reaktor kontinuierlich betrieben werden kann, also mit einem ständig brennenden Plasma, dann wird man das frische Deuterium und Tritium in Form kleiner tiefgefrorener Kügelchen in das Plasma schießen. Andererseits wird man laufend die äußere Schicht des Plasmas abschälen, sie durch ein spezielles Magnetsystem auslenken und von den als Verschmelzungsprodukte entstandenen Helium-Atom-

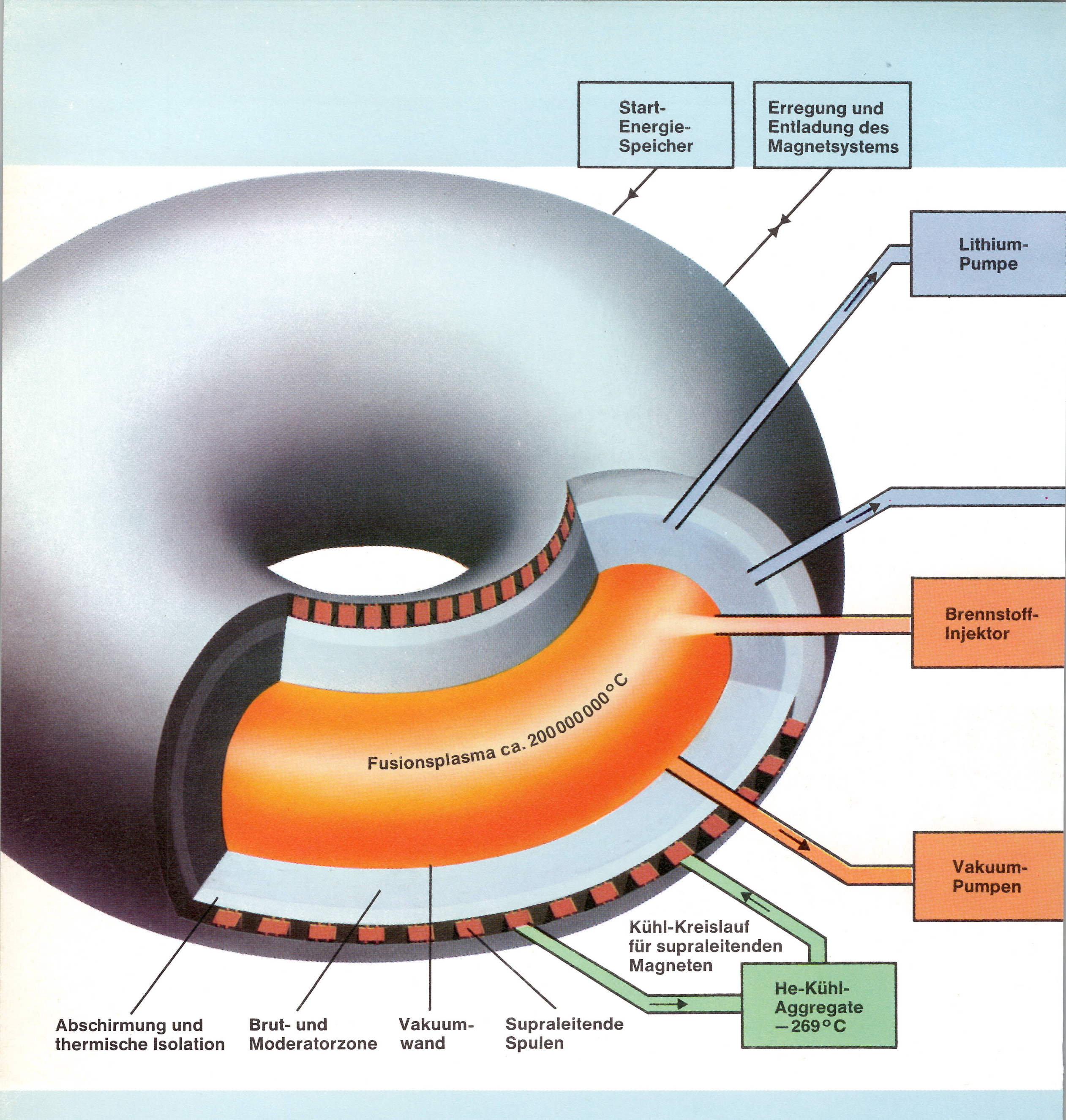
kernen reinigen. Beim impulsförmigen Betrieb, also einem jeweils nur kurzzeitigen Brennen des Plasmas, bereitet dessen Reinigung und Ergänzung kein Problem, doch man muß ein sehr ökonomisches System zur Speicherung der jeweils im Magnetfeld des Reaktors eingesetzten Energie finden. Das Magnetfeld muß ja bei jedem Impuls neu aufgebaut werden. Das sind alles bisher ungelöste, doch im Prinzip lösbar erscheinende Probleme.

Parallelen zur Brüter-Entwicklung

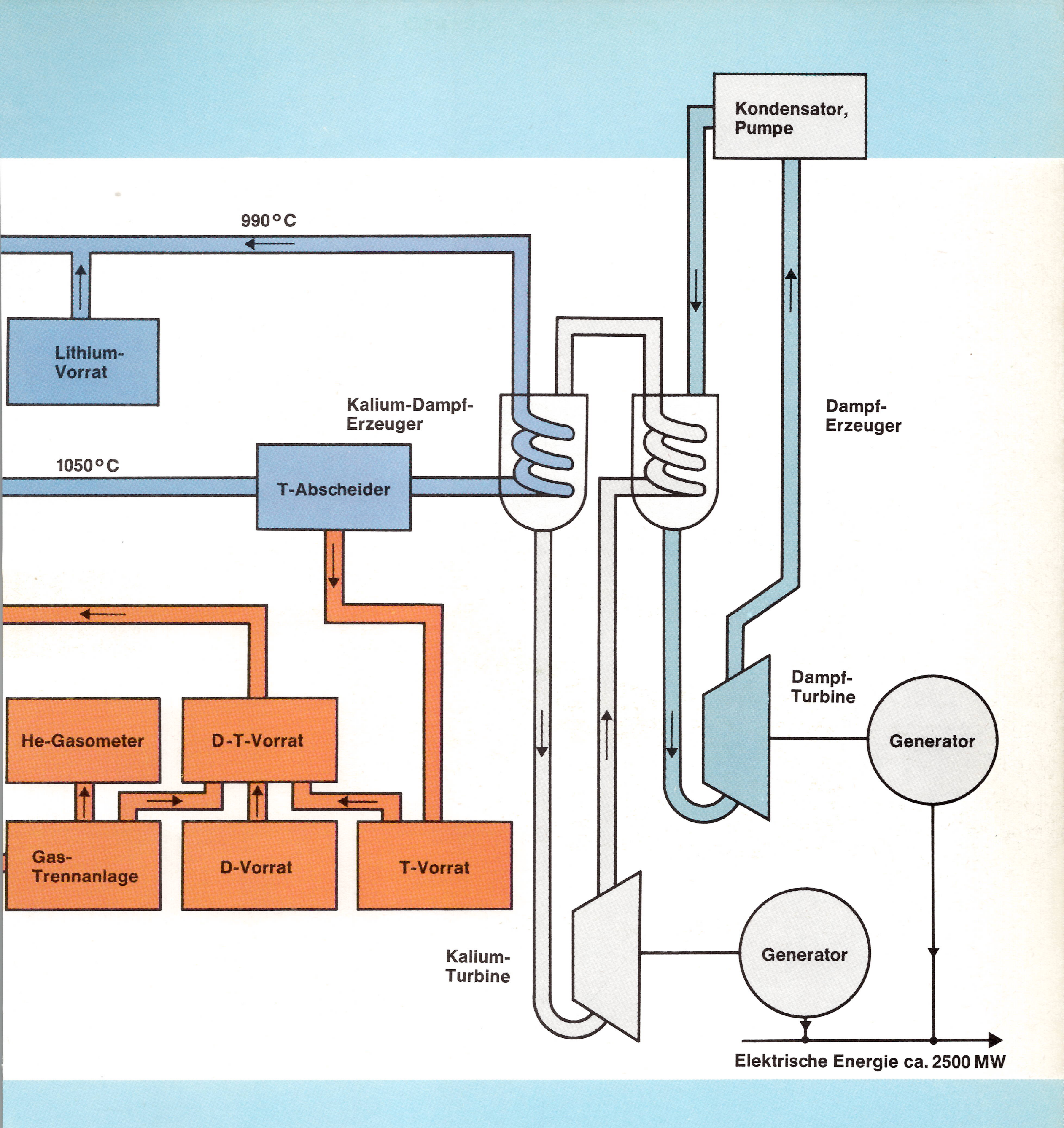
Als das entscheidende Schlüsselproblem künftiger Fusions-Leistungsreaktoren ist aber wohl die Belastbarkeit und Beständigkeit des ringförmigen Vakuumrohrs anzusehen. Es ist einem ständigen Neutronenfluß von 10^{14} Neutronen pro Quadratzentimeter und Sekunde ausgesetzt, und diese Neutronen haben eine Energie von 14 Millionen Elektronenvolt (MeV). Der Wärmefluß in der Rohrwand beträgt 1,3 Kilowatt pro Quadratzentimeter, und das Rohr ist etwa 1000 Grad Celsius heiß. Dabei darf von dieser Rohrwand so gut wie kein Material zerstäuben, denn die Verunreinigung eines Wasserstoffplasmas durch schwerere Atome führt zu einer sehr schädlichen Abkühlung. Die schweren Atome entziehen den leichten Plasmateilchen ihre Bewegungsenergie und strahlen sie als elektromagnetische Energie ab. Als Werkstoff für das ringförmige Vakuumrohr denkt man an Niob.
Es handelt sich hier um Probleme, die denen der Brüter-Entwicklung sehr ähnlich sind. Hier wie dort treten hohe Energiekonzentrationen und ein intensiver Fluß schneller Neutronen auf, hier wie dort wird gebrütet und mit flüssigem Metall gekühlt, hier wie dort besteht die Hauptschwierigkeit in den Materialproblemen.
Dennoch bieten die Fusions-Kernkraftwerke gegenüber allen bisher diskutierten, die Kernspaltung ausnutzenden Anlagen zwei entscheidende Vorteile: Sie erzeugen keine langlebigen Spaltprodukte, und wir zapfen mit ihnen neue Energieträger an, die wirklich unerschöpflich sind.
Das Endprodukt der Kernverschmelzung ist Helium-4, das chemisch wie physikalisch neutral und ungefährlich ist. Was an Radioaktivität erzeugt wird, ist die in den Wänden und anderen Baumaterialien des Reaktors durch die Neutronen-

Ringförmige Magnetfeldanordnungen – wie dieses Stellarator-Modell des Garchinger Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik – bieten die beste Voraussetzung für den sicheren Einschluß eines heißen Plasmas, was wiederum die wesentliche Voraussetzung für den Bau eines Fusionsreaktors ist. Die im Bild erkennbaren Anschlüsse sind die zu den darunterliegenden Magnetfeldspulen führenden Kühlwasserleitungen.

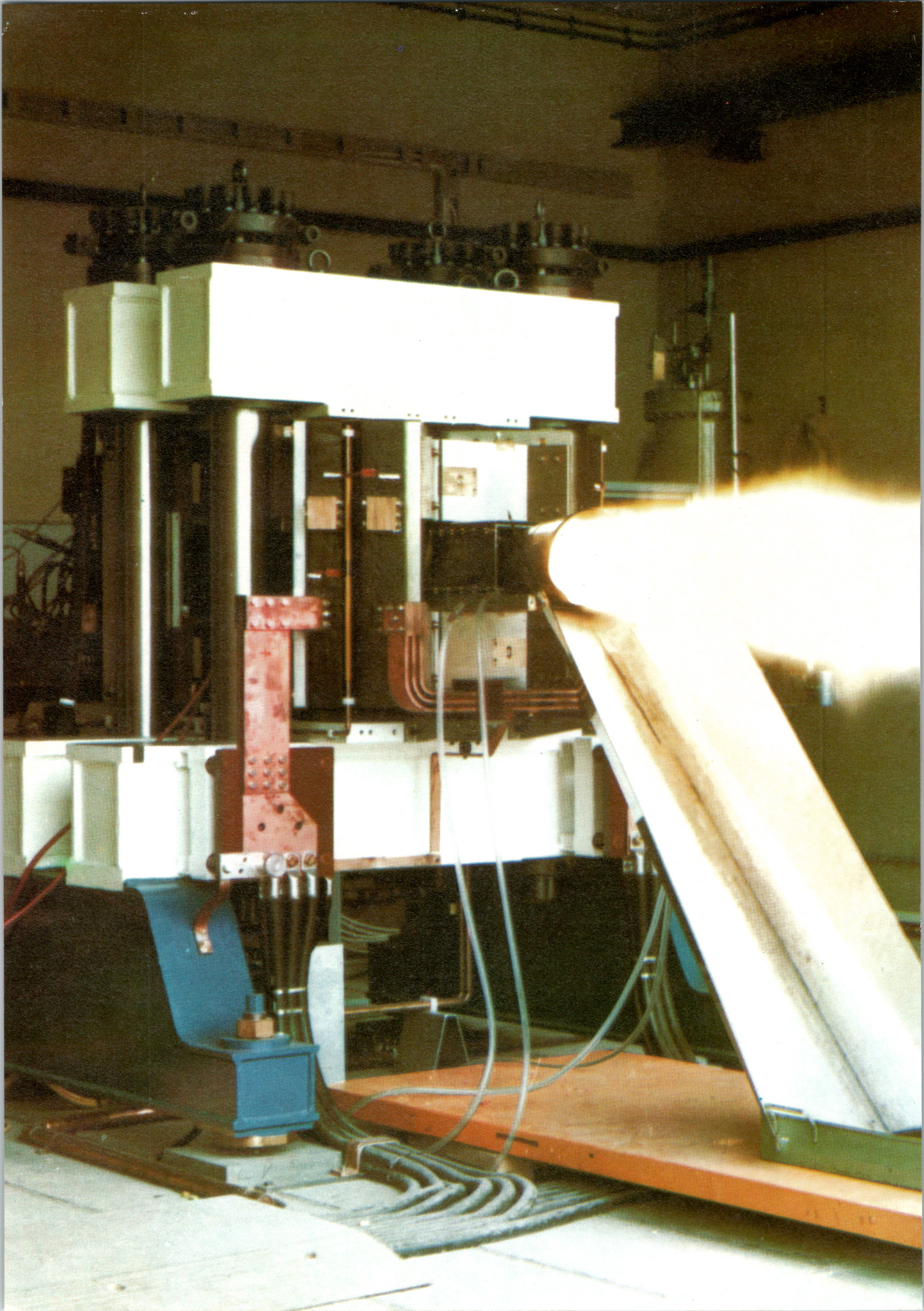


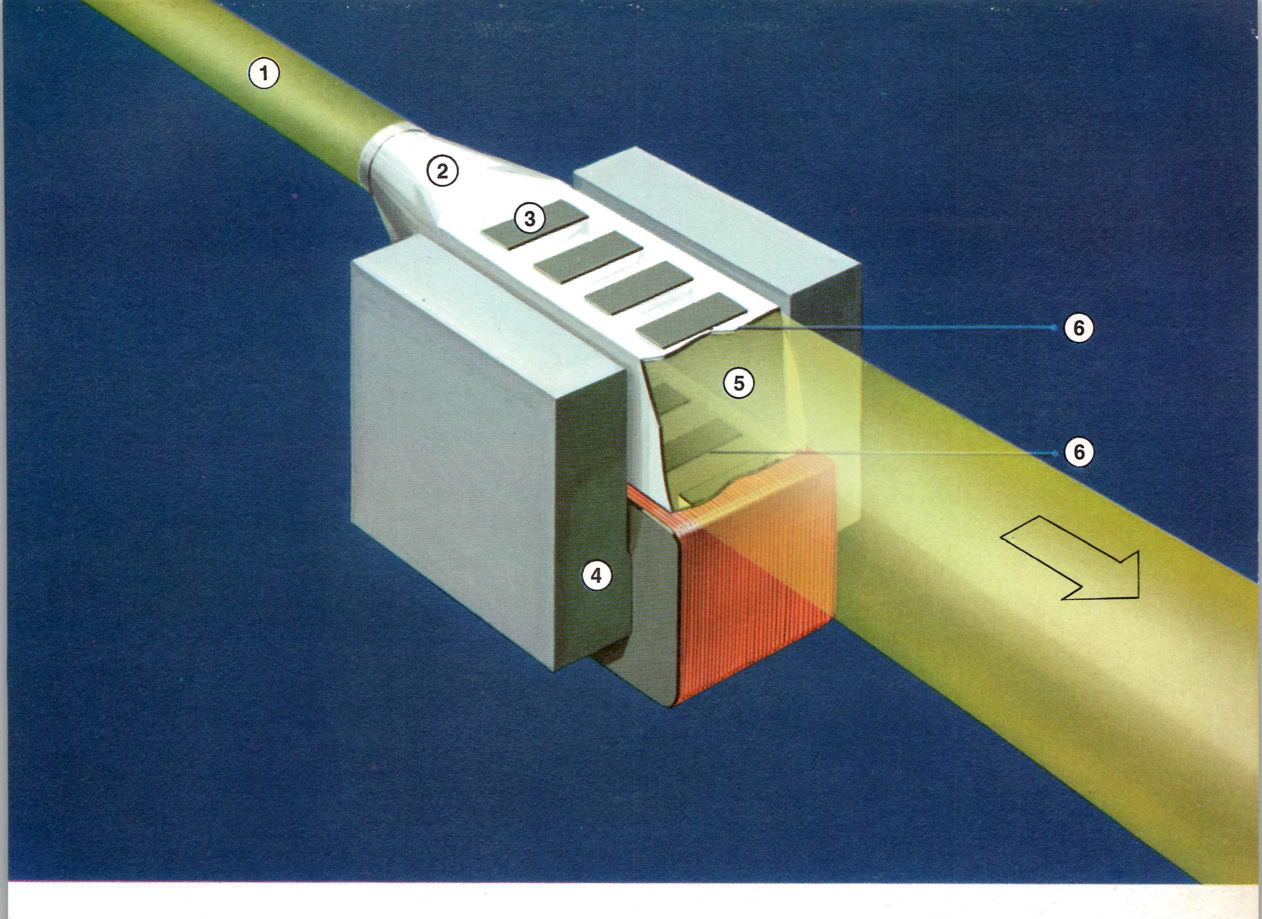


So stellt man sich in Garching den Aufbau eines künftigen Fusions-Kernkraftwerks vor. Das torusförmige Vakuumrohr mit dem Plasmaring ist von mehreren betriebsnotwendigen und schützenden Mänteln umgeben. Die zu nutzende Wärme entwickelt sich in der Brut- und Moderatorzone, aus der ständig heißes Lithium zur Wärmeerzeugung und zur Abtrennung des erbrüteten Tritiums abgezogen und



später wieder zurückgespeist wird. Während das für die Kernfusions-Reaktoren benötigte Deuterium leicht aus Wasser gewonnen werden kann, muß das Tritium aus Lithium erbrütet werden. Diese beiden Wasserstoff-Isotope werden dann als Eiskügelchen in das heiße Plasma geschossen. Das Fusionsprodukt ist Helium, das aus dem Vakuumraum laufend abgepumpt werden muß.





Oben: Das Prinzip des magnetohydrodynamischen Energiewandlers (MHD-Generator) ist recht einfach. Das durch eine Düse strömende Plasma wird in einem quer dazu angeordneten starken Magnetfeld entmischt. Die positiven und negativen Plasmateilchen stoßen getrennt auf zwei gegenüberliegende Elektroden und geben hier ihre Ladungen ab. Zwischen den gegenüberliegenden Elektroden wird also eine technisch nutzbare elektrische Spannung aufgebaut.
1 Heißes Gas mit Zusatz 2 Düse 3 Elektroden 4 Magnet 5 MHD-Generator-Kanal 6 Stromabnahme

Links: Das Versuchsmodell eines großen, mit Verbrennungsgasen arbeitenden MHD-Generators in Garching. Unter Verwendung eines etwa zehn Sekunden lang brennenden Raketentreibsatzes wird eine Leistung von einigen Megawatt erzeugt.

Strahlung induzierte Radioaktivität. Auch ein Fusionsreaktor dürfte also wie ein Spaltungsreaktor nach der Stillegung nicht ohne weiteres begehbar sein. Was die potentielle Gefahr einer radioaktiven Verseuchung der Umgebung bei einem schweren Reaktorunfall betrifft, sind die Vorteile des Fusionsreaktors eindeutig. Gefährlich sind allein die wenigen Kilogramm Tritium, die in einem solchen Fall austreten können. Die Menge der Spaltprodukte beträgt in einem großen Core eines herkömmlichen Kernspaltungsreaktors einige Tonnen. Andererseits sind die Spaltprodukte mehrfach umhüllt und gesichert, während das Tritium des Plasmas viel leichter einmal ausbrechen kann. Wasserstoffgas – darum handelt es sich ja bei einem Fusionsplasma – kann auch einmal chemisch explodieren. Brennstoffsorgen scheiden beim Fusionsreaktor insofern aus, als Lithium auf der Welt viel häufiger als Uran und Thorium ist und auch mit viel geringerem Aufwand gewonnen werden kann. Sollte aber einmal wirklich Lithium knapp oder teuer werden, wird man auch mit Deuterium allein arbeiten können, nur die Entzündungstemperaturen des Plasmas sind dann höher. Deuterium ist jedoch in den Weltmeeren in einer Menge vorhanden, die der Mensch nie wird verbrauchen können.

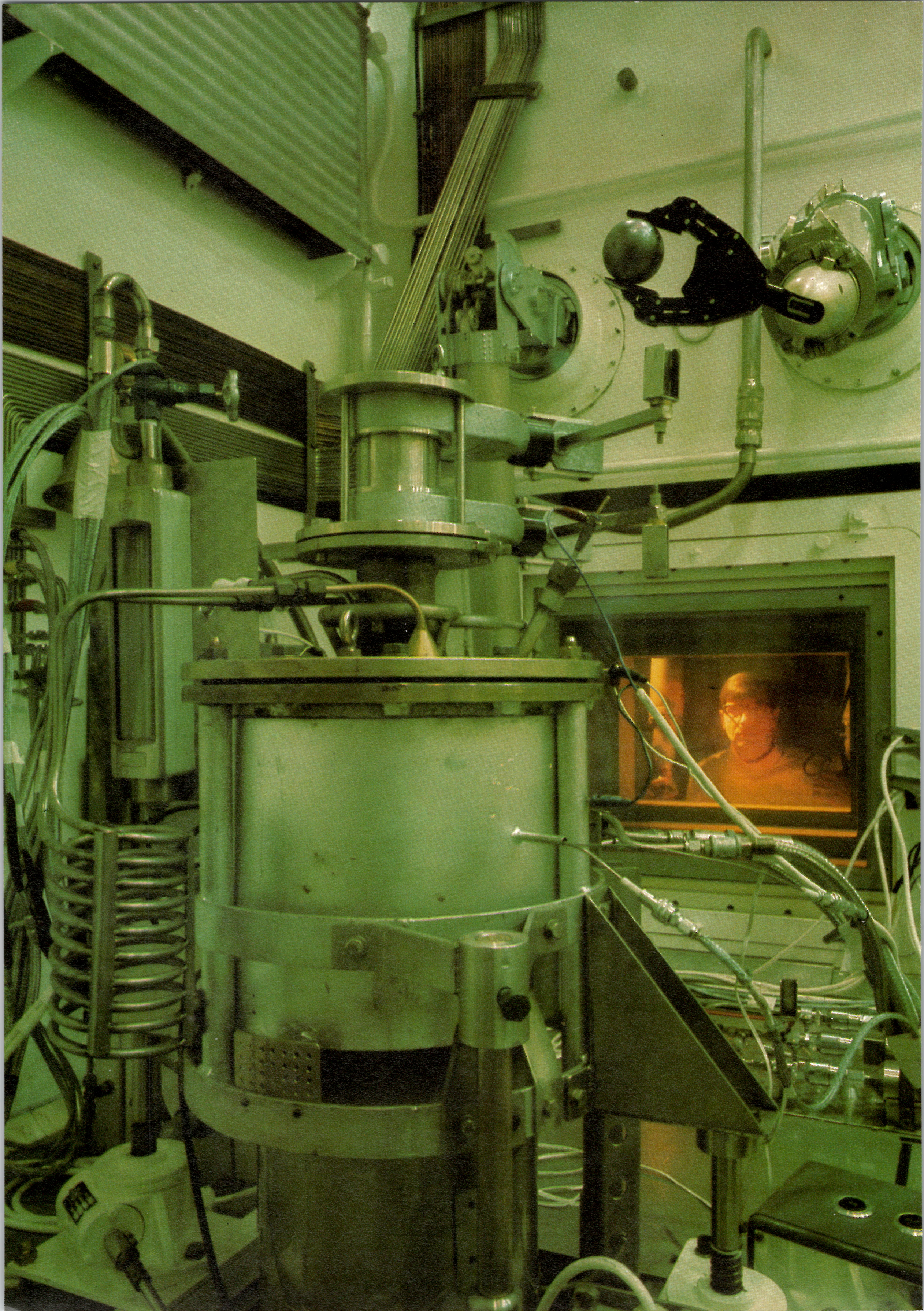
Das experimentelle Programm der Garchinger Fusionsreaktor-Entwicklung geht auf den Anfang der sechziger Jahre zurück. Es bestand zunächst in einer großen Zahl vieler kleiner Experimente. Aus diesen vielen Experimenten schälten sich mehrere größere heraus, die dann in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre zu Ergebnissen führten, auf denen sich der heute in der Fusionsforschung vertretene Optimismus gründet. Jetzt ist man in Garching dabei, sich auf vier große Versuchsanordnungen zu beschränken, von denen eine zu der in der Sowjetunion konzipierten Tokomak-Familie gehört. Ein zweites Experiment ist ein großer Stellarator in Garching, nach alter Tradition als Wendelstein bezeichnet, mit supraleitenden Magnetspulen. Wenn diese vier Experimente gelaufen sind, wird man sich auf eine oder maximal zwei noch größere Versuchsanordnungen beschränken, in denen dann bereits alle Elemente eines künftigen Fusionsreaktors zusammen erprobt werden können, jedoch ohne Einsatz eines richtigen Fusionsplasmas. Nach diesen Experimenten könnte dann der Bau des ersten Laborreaktors erfolgen. Die Entscheidung darüber steht schätzungsweise 1975 an. Erst beim Betrieb dieses Laborreaktors wird sich herausstellen, ob es wirklich möglich ist, ein in ein Magnetfeld eingeschlossenes Plasma durch Kernverschmelzungen am Brennen zu halten, also seine durch Strahlung verursachten Energieverluste fortlaufend durch neue Energie von Kernverschmelzungen auszugleichen. Erst dann läßt sich endgültig entscheiden, ob Fusions-Kernkraftwerke wirklich möglich sind.

Es handelt sich hier also in der Tat um ein Fernziel, das mit Energie und angemessenem Aufwand weiterverfolgt werden sollte. Doch es wäre töricht, die berechtigten Hoffnungen auf die Erreichung dieses Ziels schon jetzt zur Grundlage energiepolitischer Entscheidungen zu machen.

Strom auf direktem Weg

Blickt man noch weiter in die Zukunft, muß man auch die Möglichkeit einer direkten Stromerzeugung, also ohne den Umweg über Turbine und Generator, mit einbeziehen. Der dazu in Frage kommende Energiewandler, der Magnetohydrodynamische (MHD) Generator, hat zwar nur indirekt etwas mit der Erschließung der Kernkraft zu tun, ist aber auch eine Anwendung der zum Fusionsreaktor führenden Plasmaphysik. Neben dem Garchinger Max-Planck-Institut für Plasmaphysik ist vor allem das Institut für Technische Physik der Kernforschungsanlage Jülich auf diesem Gebiet aktiv. Hier arbeiten bereits mehrere große MHD-Versuchskreisläufe. Die bereits in den fünfziger und sechziger Jahren in den USA und auch in Europa vor allem in der Industrie verfolgten MHD-Experimente blieben alle nach einiger Zeit stecken, weil ihnen ein schneller Erfolg nicht beschert zu sein schien. Darum vermag man heute nur schwer zu sagen, ob, wann und wie diese Entwicklung einmal zum Zuge kommen wird. Sie müßte dann eine echte Ausweitung der Möglichkeiten sein, die der Hochtemperatur-Reaktor, gasgekühlte Brüter oder Fusionsreaktoren einmal bieten werden. Der Versuch, die in einem heißen Gas auftretenden elektrischen Ladungen in einem Magnetfeld zu sortieren und direkt in einen elektrischen Strom umzulenken – das MHD-Prinzip – ist von der Idee her sicher sehr reizvoll. Doch die zündende Idee allein genügt nicht. –

So sind wir sehr weit in die Zukunft vorgestoßen, ohne dabei den festen Grund der heute erkennbaren Entwicklungen zu verlassen. Seit eh und je hat man bei der Nutzung der Kernenergie viel von der Zukunft gesprochen, doch heute ist diese Zukunft wesentlich realer, als sie es vor zehn oder fünfzehn Jahren sein konnte. Es ist eine Zukunft, die in neue Dimensionen der Energieerzeugung führt. Dimensionen, die uns heute mitunter schwer vorstellbar erscheinen, die aber die Voraussetzung dafür sind, daß wir die großen sozialen Probleme unserer Zeit und die jetzt mit einiger Verspätung in unseren Gesichtskreis tretenden Umweltprobleme lösen können. Ohne zusätzliche elektrische Energie läßt sich der Hunger nicht meistern. Aber auch wo Luft und Wasser gefiltert und geklärt werden sollen, braucht man elektrischen Strom.



Spaltstoff – das A und O

Die Rolle des Brennstoffkreislaufs

Nun ist die Kraftwerksentwicklung nur die eine Seite der Kernkrafterschließung. Die andere Seite ist der Brennstoffkreislauf. Viel mehr als herkömmliche Kohle- oder Öl-Kraftwerke müssen sich Kernenergieanlagen zu ihrer Brennstoffversorgung und Abfallbeseitigung auf eine aufwendige Infrastruktur stützen können, deren zentrales Mittelstück aus einem System spezieller metallurgischer und chemischer Anlagen besteht. Der Brennstoffkreislauf ist ein integraler Bestandteil der Kernkraftnutzung und gewinnt um so mehr an praktischer und ökonomischer Bedeutung, je weiter die Kraftwerksentwicklung voranschreitet.
Während man zum Beispiel bei den Schwerwasser-Reaktoren noch ohne Spaltstoff-Anreicherung und Aufarbeitung der verbrauchten Brennelemente auskommen kann, geht das bei den Leichtwasser-Reaktoren schon nicht mehr. Die Aufarbeitung der verbrauchten Brennelemente ist hier allerdings vorerst nur zur rationellen Beseitigung der radioaktiven Abfallprodukte erforderlich. Auf die Rückführung des abgebrannten Urans kann man angesichts der derzeitigen Natururan-Schwemme noch verzichten. Für Hochtemperatur-Reaktoren gilt das schon nicht mehr. Ihr Kernbrennstoff ist hochgradig angereichert und zu teuer, um nach der ersten Teilnutzung, die durch die Entstehung der neutronenabsorbierenden Spaltprodukte begrenzt wird, einfach fortgeworfen werden zu können. Beim Schnellen Brüter schließlich sind die Anforderungen an den Brennstoffkreislauf noch größer. Hier hängt die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung in hohem

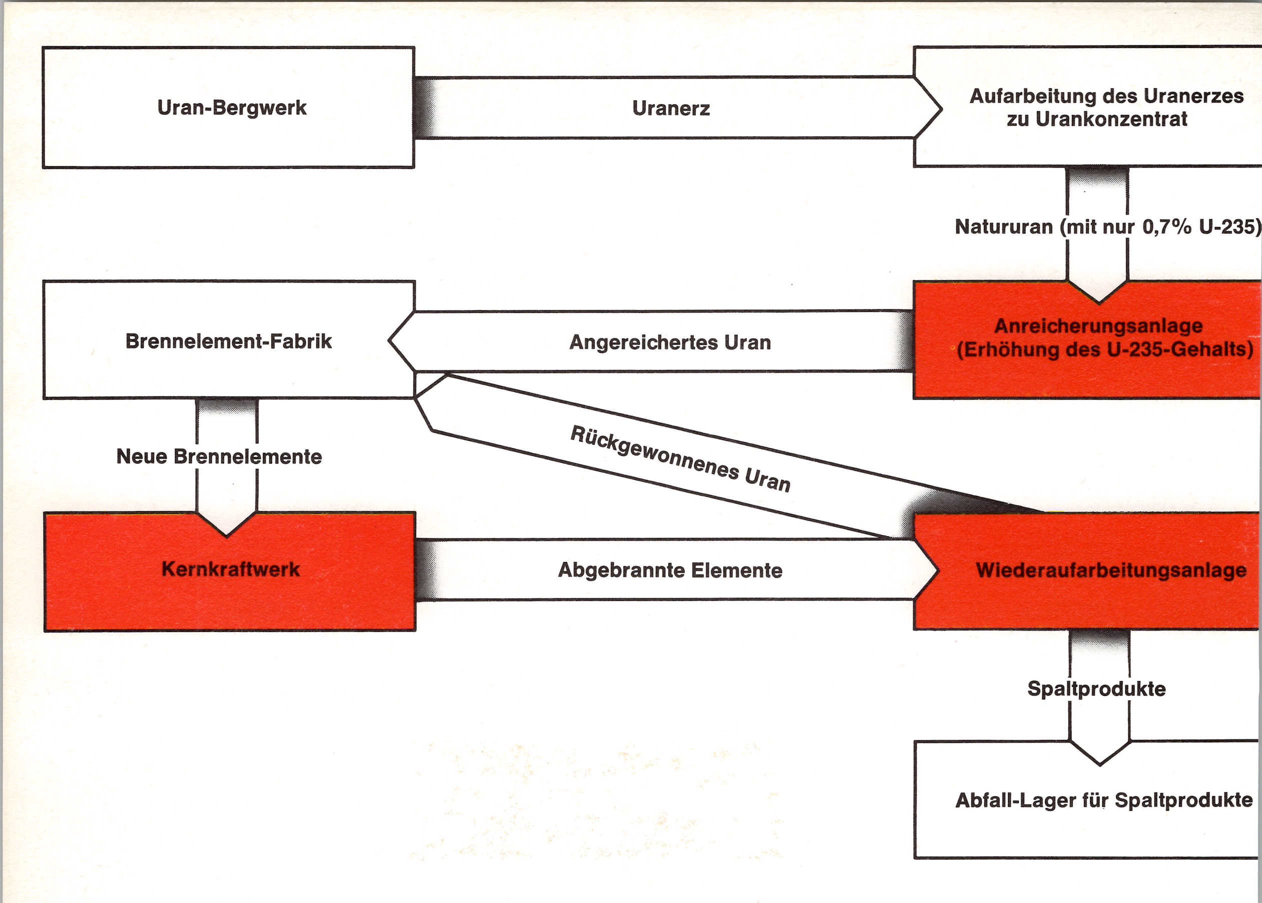
Es liegt in der Natur von Kernspaltungsprozessen, daß vom eingesetzten Kernbrennstoff immer nur ein Teil ausgenutzt und der kostbare Rest wieder aufgearbeitet werden muß. Wegen der Radioaktivität der Spaltprodukte kann das nur hinter dicken Mauern – automatisch oder per Fernbedienung in sogenannten Heißen Zellen – geschehen. Hier ein sehr seltener Blick in das Innere einer solchen Zelle. Man untersucht dort bestrahlte THTR-Brennelementkugeln.

Maße davon ab, daß der aus dem Reaktor kommende, neu erbrütete Spaltstoff und die noch vorhandenen, hochkonzentrierten Spaltstoffreste schnell wieder aufgearbeitet und in den Reaktor zurückgeführt werden. Ein erheblicher Kostenanteil ist bei den Brütern die Verzinsung des Spaltstoffinventars. Dieses muß um so größer sein, je länger die Phase der Wiederaufarbeitung und Rückführung dauert. Dabei stellt die Spaltstoffmenge außerhalb des Reaktors ein totes Kapital dar, das so klein wie möglich gehalten werden sollte.
So kommt es, daß die Entwicklung des Brennstoffkreislaufs gegenüber der Entwicklung der Kernkraftwerke nachhinkt, vor allem ökonomisch. Alle heutigen Anreicherungs- und Wiederaufarbeitungsanlagen wurden mit staatlichen Mitteln errichtet, und die hier heute berechneten Kosten und Preise sind künstlich. Der hier noch anstehende Forschungs- und Entwicklungsaufwand läßt sich zum Teil nur durch öffentliche Gelder finanzieren. In der Bundesrepublik Deutschland haben sich die Aufwendungen zur Weiterentwicklung der verschiedenen Techniken des Brennstoffkreislaufs innerhalb von fünf Jahren verzehnfacht. Sie erreichen gegenwärtig einen Betrag von über 100 Millionen DM pro Jahr. Lediglich für das Uran und bei der Brennelementfertigung für kommerzielle Wasserreaktoren werden die Preise heute vom Markt bestimmt, bestehen also kostengerechte Preise.

Bewährte und neue Anreicherungstechniken

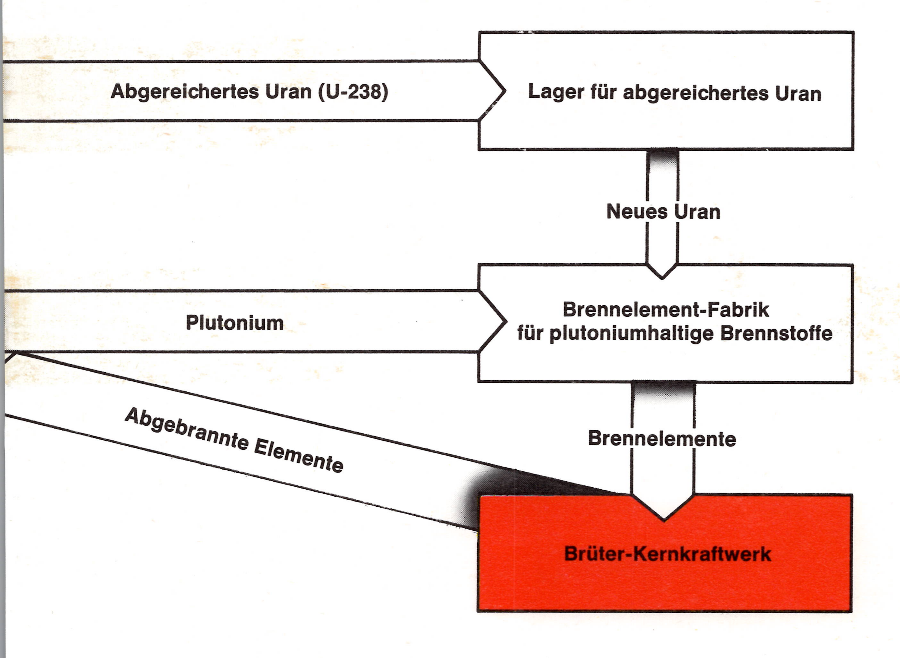
Das Schlüsselproblem des Brennstoffkreislaufs ist zweifellos die künstliche Anreicherung des spaltbaren Uran-Anteils, des U-235, im Kernbrennstoff des Reaktors. Von Natur aus beträgt der spaltbare Anteil nur 7,15 Gramm je Kilogramm Uran. Er wird für Siedewasser-Reaktoren künstlich auf etwa 25 Gramm und für Druckwasser-Reaktoren auf 33 Gramm je Kilogramm erhöht. Diese künstliche Erhöhung – im allgemeinen als Anreicherung bezeichnet – kann nur in der Form erfolgen, daß man die vier- bis fünffache Natururanmenge nimmt und davon den nichtspaltbaren Anteil, das U-238, zum großen Teil abtrennt und fortwirft, also als Abfall behandelt. Diese Abtrennung ist jedoch technisch sehr schwierig und entsprechend aufwendig, da sie nur durch die Ausnutzung eines sehr schwachen physikalischen Effekts gelingt. Kernbrennstoffanreicherung ist nur durch Ausnutzung des minimalen Massenunterschieds möglich, der zwischen einem U-235-Atom und einem U-238-Atom, jedes jeweils an sechs Fluor-Atome gebunden, besteht. Der Massenunterschied kommt zur Wirkung, wenn das Uranhexafluorid durch poröse Wände diffundiert, es durch eine Trenndüse strömt oder zentrifugiert wird. Darauf beruhen die drei heute in Anwendung und Erprobung befindlichen Anreicherungstechniken, das Gasdiffusionsverfahren, das Trenndüsenverfahren und das Zentrifugenverfahren.

Beim Diffusionsverfahren wandern die Uranhexafluorid-Moleküle unter hohem Druck durch ein Diaphragma, durch eine poröse Scheidewand. Dabei entwickeln die leichteren Moleküle – die mit dem U-235-Atom – eine etwas höhere Geschwindigkeit. Dementsprechend besteht in dem Raum vor dem Diaphragma eine etwas höhere U-238-Konzentration als dahinter. Der Trennfaktor je Wand ist jedoch so klein, daß an die tausend solcher Trennstufen hintereinandergeschaltet werden müssen, um eine Anreicherung auf etwa 3 Prozent U-235-Gehalt zu erzielen. Zu jeder dieser tausend Trennstufen gehören Gas-Kompressoren, die aus wirtschaftlichen Gründen recht groß sein müssen. Darum lassen sich Gasdiffusions-Trennanlagen nur in sehr großen Einheiten bauen. Sie kosten dann entsprechend viel, und ein einzelnes europäisches Land kann so eine Riesenanlage vorerst auf Jahre hinaus nicht voll auslasten.
Sämtlicher angereicherter Kernbrennstoff kommt heute aus Gasdiffusions-Trennanlagen. Soweit er im Westen eingesetzt ist, kommt er aus drei großen amerikanischen, ursprünglich einmal für militärische Zwecke errichteten Anlagen. Die Ostblock-Reaktoren und das erste Leichtwasser-Kernkraftwerk Frankreichs werden von entsprechenden, nicht näher bekannten sowjetischen Anlagen beliefert. Es läßt sich errechnen, daß der Kernbrennstoffbedarf der westlichen Welt spätestens 1980 nicht mehr durch die amerikanischen Anlagen allein gedeckt werden kann. Andererseits könnte ein Land wie die Bundesrepublik Deutschland eine Gasdiffusionsanlage von wirtschaftlicher Mindestgröße erst etwa ab 1985 voll auslasten. Die Leistung einer solchen Anlage müßte 5000 bis 7000 Tonnen Trennarbeit pro Jahr betragen, aber das wäre erst etwa 1985 der Bedarf der Bundesrepublik. Die Investitionskosten für eine Gasdiffusions-Trennanlage von wirtschaftlicher Mindestgröße werden heute auf 4 bis 7 Milliarden DM geschätzt.
Die einzige Alternative kann hier nur internationale Zusammenarbeit sein. Es wird aber auch verständlich, daß sich Großbritannien, Holland und die Bundesrepublik zusammengetan haben, um eine neue Trenntechnik zur Produktionsreife zu entwickeln, eine Technik, bei der die wirtschaftliche Mindestgröße bedeutend kleiner ist und die auch im Betrieb wegen des weitaus geringeren spezifischen Energieverbrauchs wesentlich billiger sein kann, sofern einmal die notwendige Betriebszuverlässigkeit erreicht wird. Es handelt sich um das Zentrifugenverfahren. Hier kann bereits eine Anlage von nur 500 bis 1000 Tonnen Trennarbeit Jahresleistung wirtschaftlich optimal sein.
Der Trennfaktor der einzelnen Zentrifuge ist rund hundertmal größer als der einer einzelnen Diffusionsstufe. Es sind hier also nur verhältnismäßig wenige Stufen hintereinanderzuschalten. Andererseits liegt der Durchsatz einer einzelnen Zentrifuge nur bei wenigen Kilogramm Trennarbeit pro Jahr. Zur Erzielung einer angemessenen Trennleistung muß man also auf jeder Stufe eine größere Anzahl von Zentrifugen parallel betreiben, so daß man hier insgesamt doch je Anlage auf

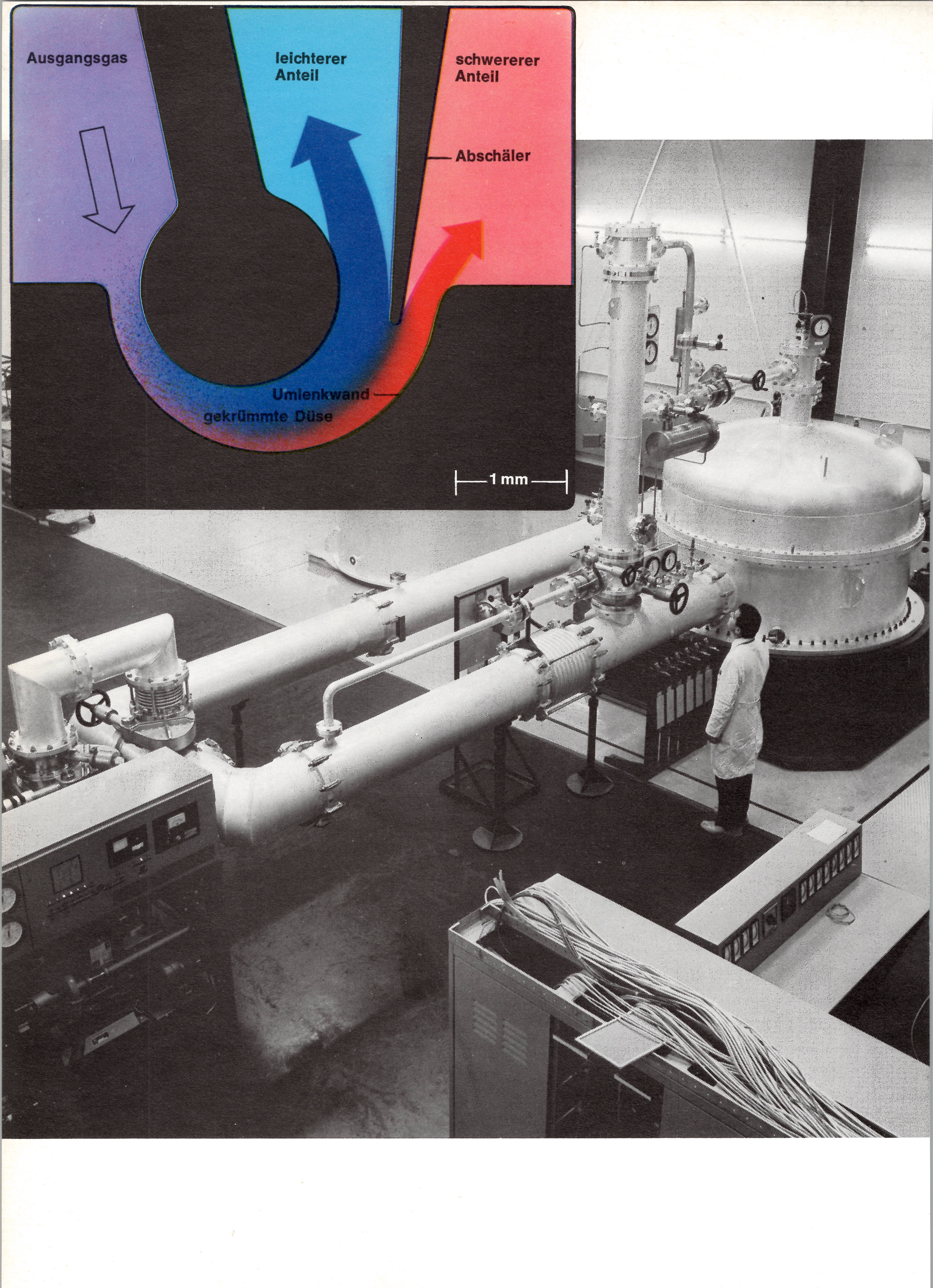


Der Brennstoffkreislauf ist ein Netzwerk von miteinander verknüpften kernphysikalischen, chemischen und metallurgischen Prozessen. Am Anfang steht die Uranerz-Gewinnung, am Ende die Dauereinlagerung der Spaltprodukte. Voll entwickelt wird der Brennstoffkreislauf erst mit den Brüter-Kernkraftwerken sein.

etwa 500000 Zentrifugen kommt. Sie so zuverlässig zu bauen, daß sie jahraus, jahrein ohne große Reparaturen und Ausfälle zuverlässig arbeiten und nicht ständig repariert werden müssen, ist das eigentliche Problem dieser Entwicklung. Wieweit es lösbar erscheint, läßt sich erst sagen, wenn für die zur Zeit in Europa in Bau befindlichen Zentrifugen-Demonstrationsanlagen Betriebserfahrungen vorliegen. In der holländischen Anlage in Almelo werden Zentrifugen holländischer und deutscher Bauart erprobt, in Capenhurst erproben die Briten ihre Zentrifugenkonstruktion. Sinn der internationalen Zusammenarbeit ist ein intensiver Erfahrungsaustausch, um zu einer bestmöglichen, wirklich zuverlässigen Zentrifugenkonstruktion zu kommen. Doch bei dieser Technik ist das Entwicklungsrisiko nicht groß. Man kann mit kleinen Anlagen beginnen, die bereits wirtschaftlich arbeiten, und sie nach und nach ausbauen.



Unterdessen wird in der Bundesrepublik Deutschland noch ein dritter Weg der Anreicherung verfolgt, das Trenndüsenverfahren. Es ist interessant, weil der Trenneffekt der hier benützten Düsen – das sind in Wirklichkeit schmale Schlitze – mindestens dreimal besser ist als beim Gasdiffusionsverfahren, und er sollte sich noch erheblich steigern lassen. Andererseits muß man auch hier das Uranhexafluorid komprimieren, braucht also auch große Kompressoren, um leistungsfähig arbeiten zu können. Das bedeutet, daß Trenndüsen-Anreicherungsanlagen in ihrer Mindestgröße zwar erheblich unter Gasdiffusionsanlagen liegen werden, doch wiederum nicht auf die kleinen Dimensionen der Zentrifugentechnik kommen. Hier sollte man bei einer Jahresleistung von 1000 bis 2000 Tonnen Trennarbeit in den wirtschaftlich optimalen Bereich kommen. Die Energiekosten je Kilogramm Trennarbeit werden bei den Trenndüsen jedoch in der gleichen Größenordnung wie bei der Gasdiffusion liegen und eher etwas größer als kleiner sein. Andererseits stecken in der Trenndüsentechnik natürlich noch Entwicklungsmöglichkeiten, während diese beim 30 Jahre alten Gasdiffusionsverfahren weitgehend ausgeschöpft sein dürften. An Betriebszuverlässigkeit stehen sich beide Techniken sicher kaum nach.
Das Trenndüsenverfahren ist im Kernforschungszentrum Karlsruhe Ende der


Ausgangsgas
leichterer Anteil
schwererer Anteil
Abschäler
Umlenkwand
gekrümmte Düse
1 mm

sechziger Jahre zunächst unter Benützung einer zehnstufigen Pilotanlage erprobt worden. Diese Anlage führte zu sehr befriedigenden Betriebsergebnissen. Als zweiter Entwicklungsschritt wurde nun eine technische Trenndüsenstufe fertiggestellt, die aus 82 Trenndüsenrohren von je 2 Metern Länge und 10 Zentimetern Durchmesser besteht. Über den Außenumfang jedes einzelnen Trennelements sind zehn schlitzförmige Trenndüsen verteilt, so daß das einzelne Element insgesamt eine Schlitzlänge von 20 Metern aufweist. Die ganze Stufe von 82 Elementen ist in einem Tank von etwa 2,2 Metern Durchmesser untergebracht und arbeitet mit einem Verdichter von 100000 Kubikmetern Stundenleistung. Bei voller Last verfügt die Karlsruher Trenndüsenstufe über etwa ein Drittel der Trennarbeitsleistung der größten amerikanischen Diffusionsstufen. Das Arbeitsgas ist ein Gemisch von Uranhexafluorid mit Helium oder Wasserstoff.
Vergleicht man die drei Trennverfahren miteinander, kommt man zu folgendem Ergebnis: Für die Diffusionstechnik spricht ihr in dreißigjährigem Betrieb erarbeitetes Know-how, vorausgesetzt, die Amerikaner sind bereit, dieses Know-how auch ausländischen Unternehmen zur Verfügung zu stellen. Für das Zentrifugenverfahren sprechen die wesentlich kleinere Mindestgröße und der wesentlich geringere Strombedarf, so daß die Zentrifugentechnik gegenüber der Diffusionstechnik je Kilogramm Trennarbeit um fast 30 Prozent billiger sein könnte. Voraussetzung ist dabei nur, man erreicht die große Betriebszuverlässigkeit der Zentrifugen. Das Trenndüsenverfahren weist zur Zeit noch höhere Betriebskosten auf als das Diffusionsverfahren, doch es verfügt über ein beträchtliches Entwicklungspotential. Außerdem erlaubt es den Bau von Anlagen, die nur ein Fünftel der Kapazität der großen Diffusionsanlagen haben.
Welches der drei Verfahren sich eines Tages bei der Errichtung einer gemeinsamen europäischen Trennanlage durchsetzen wird, läßt sich also vorerst noch nicht sagen. Außerdem werden bei dieser Entscheidung nicht nur sachliche, sondern vor allem politische Argumente den Ausschlag geben. Zum Beispiel ist Frankreich dabei, seine ursprünglich für militärische Zwecke errichtete Gasdiffusions-Trennanlage in Pierrelatte weiter auszubauen, wohl in der Hoffnung, so eine Entscheidung der europäischen Partner für Gasdiffusion mit französischem Know-how herbeizuführen.

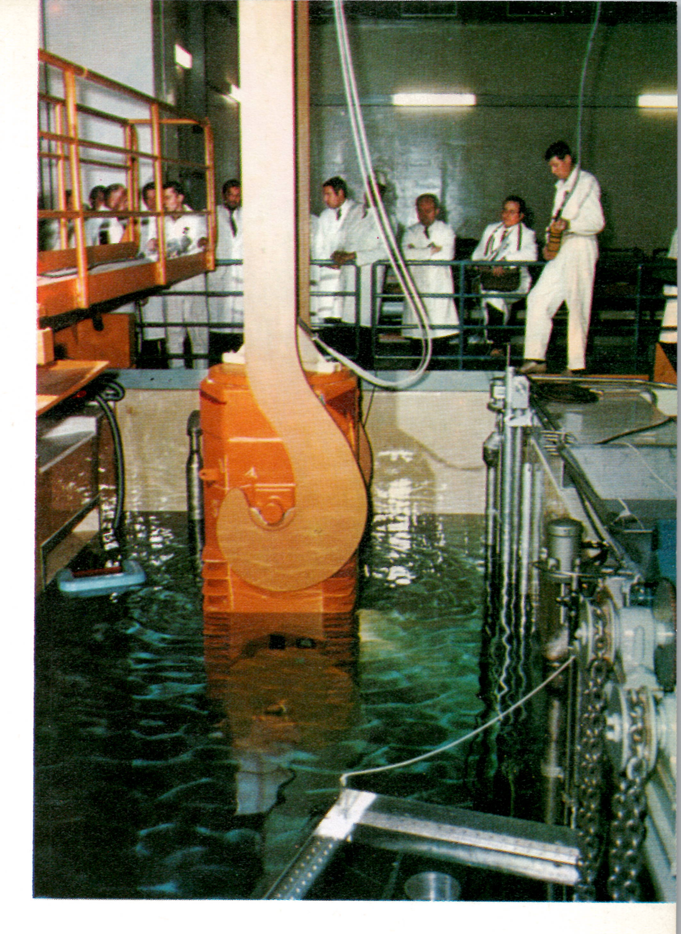
Querschnitt durch einen Trenndüsenschlitz. Als Folge der Düsenkrümmung reichern sich die schwereren Uranhexafluorid-Moleküle – die des schweren Uran-Isotops U-238 – in der äußeren Randzone an. Eine erste Trenndüsenstufe im großtechnischen Maßstab, bestehend aus 82 Trenndüsenrohren mit je 10 Schlitzen von 2 Meter Länge, arbeitet seit kurzem im Kernforschungszentrum Karlsruhe. Das Bild zeigt die Stufe in demontiertem Zustand.

Schließlich besteht die Möglichkeit, daß die derzeitigen großen Uranlieferanten auch Anreicherungsanlagen errichten, um den Weltmarkt gleich mit angereichertem Kernbrennstoff zu beliefern. Wo reiche, preisgünstig abbaubare Uranerzlager mit billigen Wasserkräften zusammentreffen, ist beste Voraussetzung geboten, selbst unter Benutzung der Gasdiffusionstechnik billig zu sein. Solche Projekte werden für Kanada, den Kongo und Australien diskutiert. Der Gewinn für Europa bestünde darin, daß das amerikanische Anreicherungsmonopol entscheidend durchbrochen würde.

Nachbehandlung für ausgebrannten Spaltstoff

Bei der Wiederaufarbeitung der bestrahlten Brennelemente liegen die ökonomischen Probleme ähnlich, doch ihre Lösung ist bei weitem nicht so prekär und nicht so mit politischem Zündstoff angereichert. Auch Wiederaufarbeitungsanlagen wirtschaftlicher Mindestgröße verlangen Investitionen. Die erste, jetzt im Bau befindliche private Aufarbeitungsanlage der USA soll bei einer Tageskapazität von 5 Tonnen Uran etwa 250 Millionen DM kosten. Die Mindestkapazität liegt bei 1500 Tonnen pro Jahr. Das entspricht einer Menge ausgebrannter Brennelemente, wie sie in Leichtwasser-Kernkraftwerken von etwa 60000 MW Gesamtleistung anfallen. Diese Kernkraftwerkskapazität wird in der Bundesrepublik erst Mitte der achtziger Jahre erreicht, und die Brennelemente dieser Kraftwerke müssen erst einige Jahre später aufgearbeitet werden. Auch hier wäre also ein europäisches Gemeinschaftsunternehmen sinnvoll. Es drängt damit jedoch nicht so sehr, denn sowohl in Großbritannien, in Windscale, wie in Frankreich, in Cap de la Hague, gibt es noch genügend freie Aufarbeitungskapazität für Leichtwasser-Brennelemente oder ließe sich hier mit geringem Aufwand schaffen. Das dürfte noch für sämtliche europäische Leichtwasser-Kernkraftwerke der siebziger Jahre ausreichen. In der Bundesrepublik besteht zur Zeit auf diesem Gebiet Unabhängigkeit von ausländischen Einrichtungen. Hier geht die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe mit einer Jahresleistung von 40 Tonnen Uranoxid im Laufe des Jahres 1971 voll in Betrieb. Sie wird allerdings den Brennelementanfall der deutschen Leichtwasser-Reaktoren nur bis etwa 1973 aufnehmen können. Als relativ kleine Prototyp-Anlage ist sie auch nicht für laufenden Betrieb gedacht, dafür arbeitet sie zu unrentabel. Sie soll vielmehr Betriebserfahrungen für spätere industrielle Großanlagen liefern, und vor allem soll sie dazu dienen, die derzeitige, auf Leichtwasser-Elemente ausgerichtete Wiederaufarbeitungs-Technologie ökonomisch an die Erfordernisse von Schnellbrütern und Hochtemperaturreaktoren anzupassen.
Technisch bestehen hier jedoch sonst keine großen Probleme. Man arbeitet allgemein nur mit sogenannten nassen Aufarbeitungsverfahren. Man löst die

Die ersten teilabgebrannten Brennelemente treffen in der neu errichteten Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe ein. Der Transportbehälter wird unter Wasser entladen, und die Elemente bleiben noch einige weitere Monate auf dem Grund dieses Absetzbeckens, nämlich bis die kurzlebige Spaltstoff-Radioaktivität abgeklungen ist.



zerstückelten Elemente mit Säure auf. Von den vielen Vorschlägen für trockene Aufarbeitung hat sich keiner durchsetzen können, und es ist auch nicht zu erkennen, daß trockene Verfahren merkliche wirtschaftliche Vorteile bringen könnten.

Der ursprünglich einmal erhoffte wirtschaftliche Gewinn der Wiederaufarbeitung ist – zumindest bei den Leichtwasser-Reaktoren – ohnehin mehr und mehr zweifelhaft geworden. Das liegt zum Teil an der zunehmend intensiveren Nutzung des Kernbrennstoffs im Reaktor. Es liegt aber auch am Preisverfall beim Plutonium, das erst in den Brütern seinen vollen Wert erlangen wird. Sollte die Wirtschaftlichkeit der Schnellbrüter-Kernkraftwerke einmal länger auf sich warten lassen, wird man das heute in den Wasserreaktoren anfallende, nur zu 70 Prozent aus spaltbarem Pu-239 und Pu-241 bestehende Plutonium rezyklieren. Man wird es in den Wasserreaktoren dem neuen Uran als spaltbaren Anteil zusetzen. Man kann dann auf eine Uran-Anreicherung ganz oder teilweise verzichten. Nur ist die Verarbeitung plutoniumhaltiger Brennstoffe – davon wird hier noch zu sprechen sein – wesentlich aufwendiger und teurer. Was den Nutzen des noch nicht abgebrannten Urans der schon einmal eingesetzten Brennelemente betrifft, sieht die Sache heute viel schlechter aus, als man ursprünglich einmal

Schacht

+200

Meereshöhen
(Zahlenangaben in m)

+100

Muschelkalk

Buntsand-
steinscholle
verstürzt

Buntsandstein

0

Auslaugungs-
rückstände des
Zechsteins

Ton

–100

–200

–300

Deckschichten

Steinsalz

–400

Buntsand-
stein

–500

Kalisalz

Einlagerungskammer

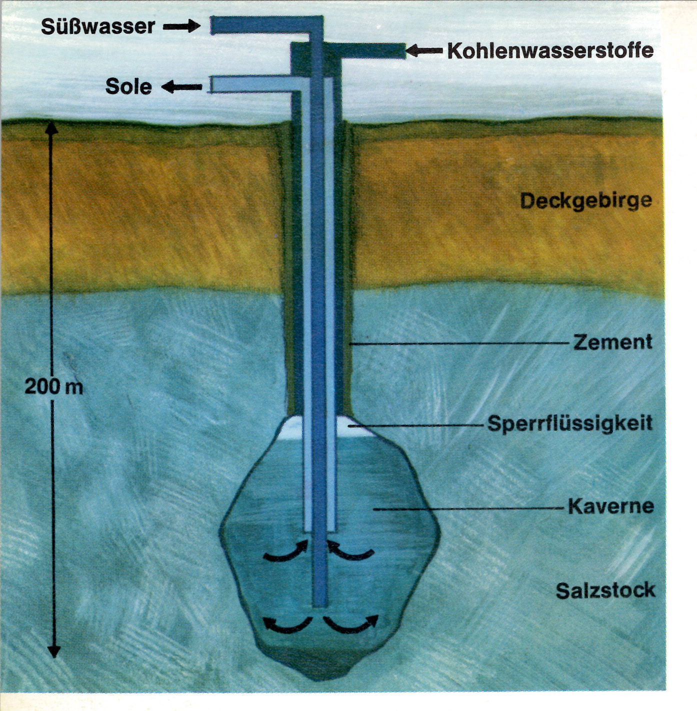


dachte. Im abgebrannten, ursprünglich auf etwa 3 Prozent angereicherten Brennstoff der Wasserreaktorelemente liegt der noch vorhandene U-235-Anteil um die 0,7 Prozent herum, entspricht also dem Natururan. Doch gegenüber dem Natururan enthält das Resturan etwa 4 Prozent des neu »erbrüteten« Isotops U-236, das recht lästig ist, weil es nur Neutronen absorbiert und nicht zur Spaltung taugt.

Salzstöcke für langlebige Spaltprodukte

So hat die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente also vor allem das Ziel, die bei den Kernspaltungsprozessen im Kernbrennstoff entstandenen neuen Atomarten, die Spaltprodukte, in den Griff zu bekommen. Es handelt sich dabei überwiegend um kurzlebige, instabile chemische Elemente mittleren Atomgewichts. Es dauert eine gewisse Zeit, bis sie durch die Aussendung einzelner Strahlungsteilchen und Strahlungsquanten eine stabile Form erreicht haben. So kommt es, daß der weitaus größte Teil der Spaltprodukte-Aktivität noch während des Reaktorbetriebs abklingt. Aus dem gleichen Grunde werden die abgebrannten Brennelemente, nachdem sie aus dem Reaktor kommen, zunächst für mindestens hundert Tage in unmittelbarer Nachbarschaft des Reaktors in einem Wasserbecken gelagert. Erst dann transportiert man sie in speziellen, mit einer Kühleinrichtung versehenen Transportbehältern in die Wiederaufarbeitungsanlage, und auch hier lagert man sie möglichst noch einmal für mehrere Monate, ehe man sie zerhackt, mit Säure auflöst und das Produkt den chemischen Trennprozessen unterwirft.
Andererseits sind die in einem Kernreaktor erzeugten Spaltstoffmengen beträchtlich. Man muß bei gut ausgenutzten Elementen von Wasserreaktoren mit etwa 30 Gramm Spaltprodukten je Kilogramm Uran rechnen. Wenn in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1980 etwa 500 Tonnen bestrahlter Kernbrennstoff dieses Typs anfallen, entspricht das einer Spaltproduktmenge von 15 Tonnen. Das sind 50 Kilogramm pro Werktag. Diese Spaltprodukte sind zwar zum größten Teil schon inaktiv, ehe sie in der Wiederaufarbeitungsanlage abgetrennt werden, doch der Anteil der langlebigen radioaktiven Spaltprodukte – etwa Cäsium-137 mit einer Halbwertzeit von 30 Jahren – ist absolut betrachtet immer noch sehr

Ein mit neuen Fördereinrichtungen ausgestattetes ehemaliges Salzbergwerk in der Nähe von Braunschweig wird auf Jahrzehnte hinaus den gesamten Atommüll der Bundesrepublik aufnehmen, so daß dieser nicht mehr in den Stoffkreislauf der Natur gelangen kann. Der Schnitt läßt das Stollensystem des ehemaligen Salzbergwerks Asse erkennen, darunter die ersten hier eingelagerten Tonnen geringer Radioaktivität.



Wo Salzstöcke bisher nicht durch ehemalige Bergwerke erschlossen sind, kann man eine Spültechnik anwenden, um ohne manuellen Aufwand Kavernen zur Atommüll-Lagerung zu schaffen. Bis zum Salzstock wird ein System von drei konzentrisch ineinandergefügten Rohren vorgescho-

stattlich. Er beträgt etwa 2 Prozent der ursprünglichen Gesamtaktivität, also 0,6 Gramm je Kilogramm Uran, und verlangt einigen Aufwand zur sicheren Endlagerung. Gerade in der Hinsicht ist aber in der Bundesrepublik Deutschland eine vorbildliche Lösung gefunden worden.
Man hat in der Nähe von Wolfenbüttel ein stillgelegtes Salzbergwerk wieder hergerichtet und für die Endlagerung von langlebigen Spaltprodukten und anderem radioaktiven Müll vorbereitet. In der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe konzentriert man die Spaltprodukt-Lösungen auf eine Aktivität von etwa 7000 Curie pro Liter und lagert sie zunächst für etwa fünf Jahre in gekühlten Edelstahltanks. Bei den radioaktiven Zerfallsprozessen entsteht Wärme, und die muß laufend abgeführt werden. Innerhalb dieser Zeit verringert sich die Aktivität der Spaltprodukte aufgrund ihres natürlichen Zerfalls nochmals auf etwa ein Zwanzigstel. Dann wird diese Lösung kalziniert und mit Borsilikat zu Glas verschmolzen. Die Glasblöcke kommen in einen fest verschweißten Edelstahlbehälter und werden dann in 490 bis 800 Meter Tiefe in das massive Salz gesetzt. Den Raum zwischen den Edelstahltonnen und den Wänden des Salzlochs füllt man wiederum mit losem Salz aus, das später unter der Wärmeentwicklung der Spaltprodukte schmilzt und einen idealen Wärmeübergang zwischen den Tonnen und dem massiven Salz der Umgebung schafft.
Während man in Kohle- oder Erzbergwerken fast immer nur einzelne Schichten des gesuchten Materials findet und die Stollen des Bergwerks darum im wesentlichen ins Gestein geschlagen sind, ist der bei Wolfenbüttel erschlossene Salzstock ein riesiger, massiver Salzblock von mehreren hundert Metern Ausdehnung nach oben

ben. Durch das innere Rohr in der Mitte führt man Süßwasser ein, durch das Rohr darüber wird das mit Salz angereicherte Wasser wieder abgepumpt. Eine auf dem Wasser schwimmende Kohlenwasserstoffschicht verhindert nach oben hin ein weiteres Wachsen der Kaverne. Später läßt man die den Atommüll enthaltenden Tonnen durch den Schacht einfach in die Kaverne fallen. Für hochgradig radioaktive Spaltprodukte ist dieses Verfahren nicht geeignet. Sie sollten intensive Berührung mit dem massiven Salz haben, damit die bei ihnen in bemerkenswertem Umfang anfallende Zerfallswärme abgeführt wird.

und zu den Seiten hin. Schon durch seine Existenz beweist er, daß er seit vielen hunderttausend Jahren aus dem Stofftransport der Erdoberfläche ausgeschieden ist und auch in Zukunft ausgeschieden bleiben wird. Nur Wasser könnte das massive Salz lösen und in den Biohaushalt der Natur gelangen lassen. Nachdem das Salz hier aber Hunderttausende von Jahren nicht mit Wasser in Berührung gekommen ist – es wäre sonst aufgelöst und fortgespült worden –, kann das auch in den nächsten hunderttausend Jahren nicht geschehen. Dann müßte schon das Meer wieder halb Europa überspülen und in Besitz nehmen, so wie es das zur Zeit der Entstehung der Salzstöcke einmal tat.
Eine sicherere Endlagerung radioaktiver Spaltprodukte erscheint derzeit kaum möglich, und zweifellos ist diese Methode der sonst noch vielfach praktizierten Versenkung der Spaltprodukte in den Ozeanen entschieden überlegen. Hier hinterlassen wir unsern Enkeln nicht ein Kuckucksei, das noch jahrhundertelang ihre Sorge und Betreuung erfordern könnte.

Der übersättigte Uranerz-Markt

Am Anfang des Brennstoffkreislaufs steht natürlich die Gewinnung des Urans, des Ausgangsprodukts. Bekanntlich ist Uran ein Metall, das chemisch gewisse Verwandtschaft mit den Elementen Chrom, Molybdän und Wolfram hat. Es kommt in der Natur, meist als Oxid, in Erzlagerstätten sehr unterschiedlicher Konzentration vor. Dabei gelten Konzentrationen zwischen 0,1 und 1 Prozent im allgemeinen

noch als abbauwürdig. Entscheidend für die Abbauwürdigkeit sind jedoch die Gewinnungskosten, wobei es vor allem darauf ankommt, ob der Abbau im großen Stil erfolgen kann oder noch viel Handarbeit erfordert.
Unter diesem Gesichtspunkt erscheinen die europäischen Uranerz-Lagerstätten fast alle als zweitklassig. In der Bundesrepublik werden die in den fünfziger Jahren angelaufenen Uran-Prospektierungen immer noch weitergeführt, doch was dabei herauskommt, ist zur Zeit schon vom Preis her uninteressant und kann auch auf lange Sicht nur ein kleiner Beitrag zur langfristigen Versorgung der deutschen Kernkraftwerke sein. Statt dessen betätigen sich die deutschen Uran-Unternehmen in bemerkenswertem Umfang im Ausland, vor allem in Kanada und Südwestafrika, aber auch in anderen Ländern der Dritten Welt. Dabei übernehmen staatliche Stellen für Aufwendungen zur Uransuche und Lagerstätten-Erschließung bedingt rückzahlbare Darlehen.
Weltweit betrachtet befindet sich der Uranmarkt zur Zeit einmal wieder im Zustand der Übersättigung. Er erlebte eine erste Phase des Aufschwungs in den fünfziger Jahren, als die Entwicklung der Kernkraftwerke noch in den Kinderschuhen steckte, die Atombomben-Produktion jedoch üppig wucherte. Damals waren nur drei große Vorkommen bekannt, eines in Kanada, am Großen Bärensee, eines in den USA, im Colorado-Plateau, und eines im damals belgischen Kongo, in Shinkolobwe. Bald liefen Gerüchte um, die Weltreserven an Uran seien in Kürze erschöpft. Dementsprechend begann man sogar in Europa fieberhaft nach Uranerzvorkommen zu suchen, und die 1958 gegründete Europäische Atomgemeinschaft glaubte, eine wichtige Aufgabe darin sehen zu müssen, eine Versorgungsagentur für Spaltstoffe zu errichten.
Dann wurden aber in den USA, in Kanada und verschiedenen afrikanischen Staaten so viele neue Uranerzvorkommen entdeckt, daß der Uranmarkt bald übersättigt war. Außerdem ließ der militärische Bedarf nach. Die Atom-Großmächte lebten von den gehorteten Uranvorräten, und der Uranmarkt schrumpfte zusammen. Er belebte sich erst wieder 1967 und 1968, als der Durchbruch der Kernkraft deutlich wurde. Vor allem in den Entwicklungsländern ging man nun an die Erschließung vieler neuer Lagerstätten, die in der Zwischenzeit entdeckt worden waren, zum Beispiel ein Vorkommen in der Republik Niger, das als das viertgrößte der Welt gilt. Andere wertvolle Lager wurden in der zentralafrikanischen Republik, in Gabun, in Argentinien und in der Republik Somali entdeckt. Seit kurzem kommen aus Australien stark beachtete Meldungen über die Entdeckung neuer, besonders kostengünstiger Lagerstätten. Dementsprechend stehen die Uranpreise unter Druck. Doch man braucht kein Prophet zu sein, um vorauszusagen, daß sich der Uranmarkt spätestens in der zweiten Hälfte der siebziger Jahre endgültig einpendeln wird und daß später auch hier mit den üblichen Preissteigerungen zu rechnen ist.

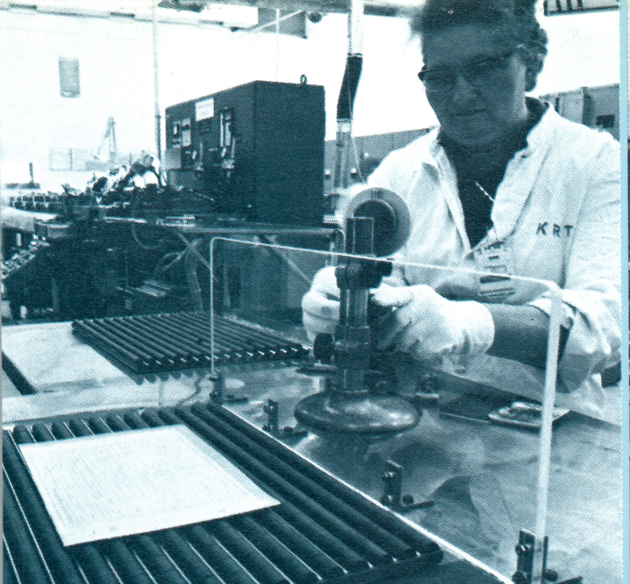
Neue Anforderungen an die Brennelement-Herstellung

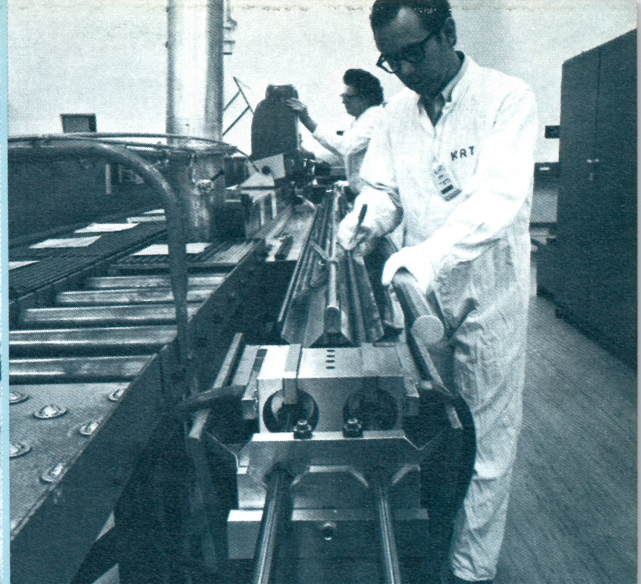
In den Brennstoffkosten-Anteil der nuklearen Stromerzeugung gehen schließlich – neben Uranpreis und Anreicherungsaufwand – vor allem die Kosten für die Brennelement-Fertigung ein. Dabei muß man heute zwar privatwirtschaftlich kalkulieren – es gibt hier außer bei Reaktoren der nächsten Generation keine öffentlichen Mittel mehr –, doch es besteht auch noch keine echte Konkurrenzsituation. Selbst für Core-Nachladungen kann der Betreiber eines Kernkraftwerks noch nicht unter mehreren Angeboten unabhängiger Brennelement-Hersteller wählen. Ein Brennelement für einen fremden Reaktor auszulegen, erfordert einen erheblichen Aufwand. Bisher verlangt jeder Reaktor eine spezielle Brennelement-Konstruktion. Um hier weiterzukommen, bedarf es einer gewissen Vereinfachung der Spezifikationen, so daß eine Standardisierung der Elemente möglich wird. Dann läßt sich die Brennelement-Herstellung mit größerer Kontinuität und besserer Auslastung der vorhandenen Anlagen betreiben. Zwar wird dann aus dem einzelnen Brennelement vielleicht nicht das letzte an Energie herausgeholt, doch der Gewinn ist eine wesentliche Verringerung der Elementherstellungskosten. Eine solche Entwicklung erscheint mit dem Anwachsen des Kernkraftmarkts unausweichlich.

Als neue Forderung an die Brennelement-Herstellung erhebt sich jetzt der Wunsch der Kernkraftwerks-Betreiber, häufiger die Leistung ihrer Kernkraftwerke – und damit auch die Belastung der darin eingesetzten Brennelemente – zu ändern. Für das große deutsche Kernkraftwerk in Biblis am Rhein werden zum Beispiel bereits 30 Änderungen zwischen voller und halber Leistung pro Monat angenommen. Je mehr Kernkraftwerke in das öffentliche Netz eingeschaltet werden, um so weniger können sie sich ausschließlich auf die Deckung der Grundlast beschränken, müssen also auch im Tagesrhythmus herauf- und heruntergefahren werden. Dadurch werden an die Hüllrohre der Brennelemente hohe Anforderungen gestellt. Eine weitere Steigerung der Brennstoffnutzung im Brennelement – eine weitere Abbrandsteigerung, die ja weitgehend von der Haltbarkeit der Hüllrohre abhängt – wird darum in Zukunft nicht mehr so leicht möglich sein.

Ein neues grundlegendes Problem entsteht, wenn man in der Brennelement-Fertigung Plutonium verarbeiten will. Im Gegensatz zum Uran ist Plutonium extrem giftig. Von Hand kann man es nur in völlig abgeschlossenen, dauernd kontrollierten Glaskästen – sogenannten Handschuhkästen – verarbeiten. Diese indirekte Handhabung macht die Fertigung von plutoniumhaltigen Brennelementen sehr aufwendig und ist nur bei der Herstellung einzelner Versuchselemente, jedoch nicht bei einer Fertigung in industriellem Maßstab möglich. So wird in der Bundesrepublik mit staatlicher Förderung an der Entwicklung einer von außen gesteuerten, mechanisierten Brennelement-Fertigung gearbeitet. Dabei geht es vor

Fertigung von Brennelementen für Wasser-Reaktoren: Der Kernbrennstoff – Urandioxid – wird in der Form eines grünlich-schwarzen Pulvers angeliefert. Eine Presse verdichtet dieses Pulver zu länglichen Tabletten, auch Grünlinge genannt (oben links außen). In Blechwannen schiebt man die Grünlinge in einen Sinterofen, wo sie für einige Stunden bei einer Temperatur von etwa 1500 Grad Celsius bleiben (oben links innen). Die Brennstofftabletten schrumpfen dabei ein Stück zusammen und werden anschließend auf Maß geschliffen und kontrolliert (oben rechts innen). Schließlich schiebt man die Brennstofftabletten in dünnwandige





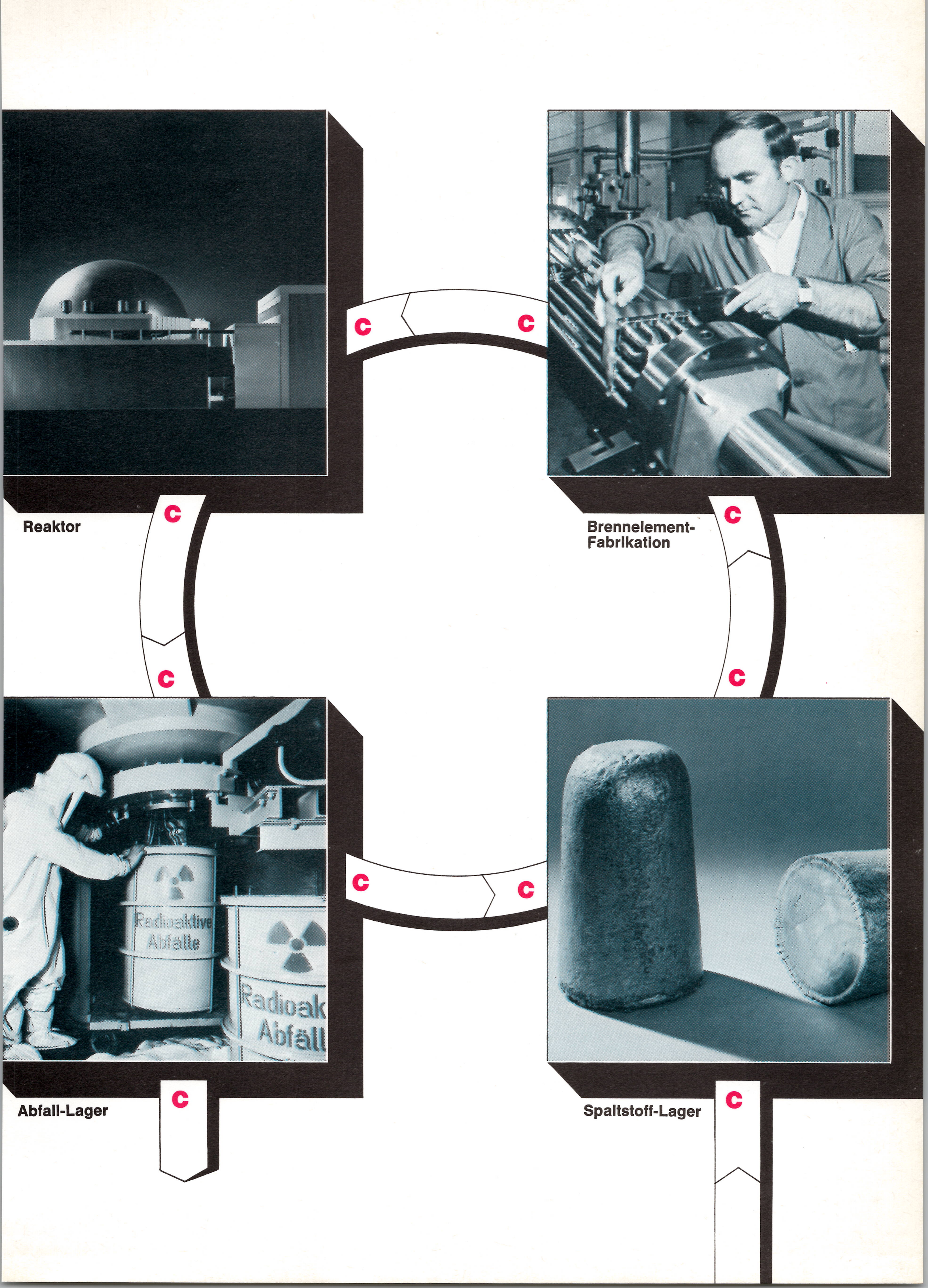
Hüllrohre (oben rechts außen) und schweißt die Rohre zu. Je 49 dieser Brennstäbe werden dann zu einem Brennelement zusammengesetzt (unten links außen). Abstandhalter und eine Art Flaschenhals zur Halterung des Elements vervollständigen die Konstruktion (unten links innen). Es folgen noch verschiedene Kontrollen (unten rechts innen). Die in Kunststoffolie verpackten fertigen Elemente warten schließlich in einem Lagerraum auf den Versand ins Kernkraftwerk (unten rechts außen). Jedes Element stellt einen Wert von etwa 250000 DM dar.

allem um die Herstellung von Brennstäben für Schnellbrüter, also mit einem Gemisch von Uran- und Plutonium-Oxid bei relativ hohem Plutoniumgehalt. Aber auch an Brennstäbe von größerem Durchmesser und geringerem Plutoniumgehalt für die Rezyklierung des Plutoniums wird gedacht. Eine automatisierte Fertigungsstraße für Brennstäbe dieser Art soll im Laufe des Jahres 1971 in Wolfgang bei Hanau entwickelt und aufgebaut werden.

Kontrolle für den Spaltstofffluß

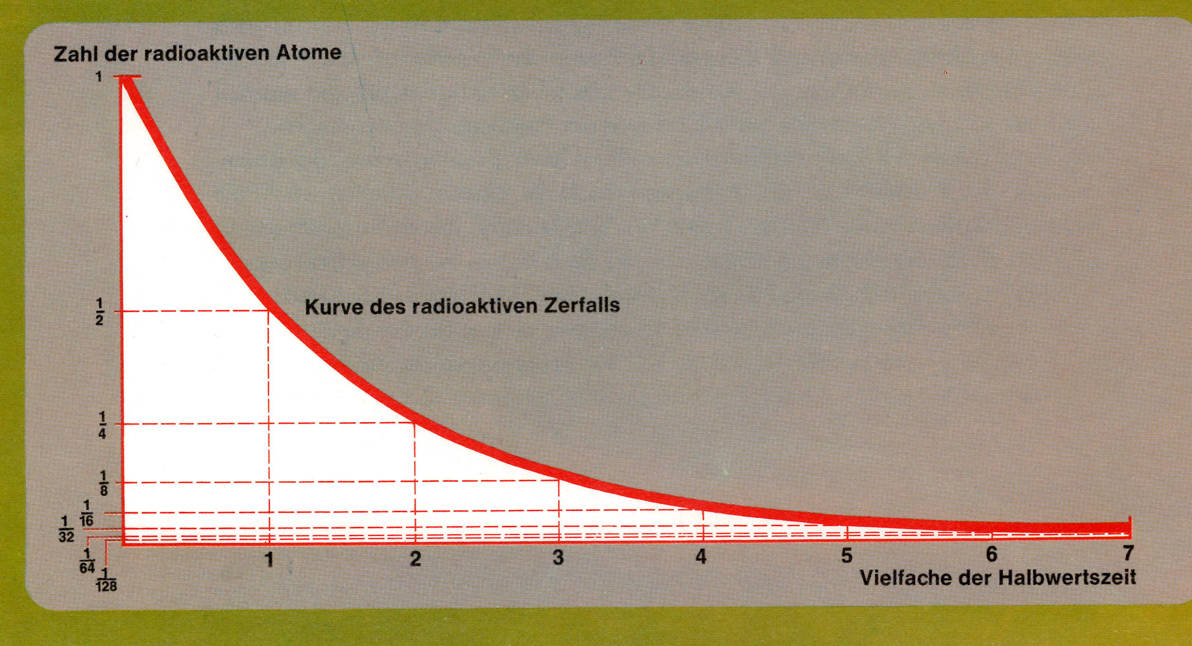
Nun hat sich die friedliche Nutzung der Kernkraft leider in der Nachbarschaft der Kernwaffentechnik ansiedeln müssen. So gilt jedes Land, das sich im größeren Stil Kernkraftwerke baut und den dazugehörigen Brennstoffkreislauf entwickelt – auch wenn es, wie die Bundesrepublik Deutschland, wiederholt feierlich auf Besitz und Produktion von Kernwaffen verzichtet hat –, als potentiell verdächtig, Kernbrennstoff zu veruntreuen. Dabei mag die Regierung eines solchen Landes ja in der Tat nichts von einer solchen Veruntreuung wissen. Es könnte passieren, daß eine Geheimorganisation in einer Wiederaufarbeitungsanlage oder sonstwo ständig in kleinen Mengen Plutonium abzweigt, um schließlich mit der Menge einer einzigen atomaren Sprengladung – etwa 3 Kilogramm – im Stil abenteuerlicher Flugzeugentführer ein ganzes Land zu terrorisieren. Das klingt etwas nach James Bond, doch je größer der Umsatz von Spaltstoffen auf der Welt wird, um so weniger kann man solche Möglichkeiten vollkommen ausschließen. Kurz und gut: Es müssen Wege gefunden werden, um den Fluß des Spaltstoffs innerhalb des Brennstoffkreislaufs zuverlässig überwachen zu können.
Als Ende der sechziger Jahre landauf, landab der Vertrag über die Nichtverbreitung nuklearer Waffen, der sogenannte Atomsperrvertrag, die Gemüter bewegte, schien man zunächst kaum darüber nachzudenken, wie denn wohl die vertragsnotwendigen Kontrollen praktisch durchzuführen seien. Die bis dahin von Euratom und der Wiener IAEO (Internationale Atomenergie-Organisation) praktizierten Prüfmethoden konnten dazu nicht ausreichen. Damals wurde, initiiert durch das Karlsruher Kernforschungszentrum, eine neue Kontrollstrategie entwickelt, die eine vollautomatische Überwachung des Spaltstoffflusses ermöglichen soll, die nach und nach Eingang in die IAEO fand und hier heute voll akzeptiert ist.

Schema der Spaltstofffluß-Kontrolle. Der Brennstoffkreislauf ist in Mengenbilanzzonen aufgeteilt. Sie sind gegenüber der Umwelt dicht, und an ihren Ein- und Ausgängen (C) werden die eingebrachten und ausgehenden Spaltstoffmengen sorgfältig analysiert und registriert.


Reaktor
Brennelement-
Fabrikation
Abfall-Lager
Spaltstoff-Lager
Radioaktive
Abfälle
C

Unterdessen befaßt man sich in verschiedenen Instituten des Karlsruher Zentrums und bei einer Reihe von einschlägigen Firmen mit der Entwicklung der Meßtechniken, die zur Realisierung dieser Kontrollen unentbehrlich sind. So ist in der Bundesrepublik ein eigenes Forschungs- und Entwicklungsprojekt zur Spaltstofffluß-Kontrolle in Gang gekommen.
Das Prinzip der Überwachung besteht nach dem nunmehr auch von der IAEO angenommenen Konzept darin, entlang des Brennstoffkreislaufs einerseits sogenannte strategische Punkte einzurichten, an denen der Materialfluß gemessen wird, und andererseits die Bereiche zwischen den strategischen Punkten zuverlässig gegenüber der Außenwelt abzudichten. Man kann dann in einen Produktionsprozeß des Brennstoffkreislaufs immer nur an einem Überwachungspunkt Spaltstoff hinein- und herausbringen. Sowohl am Eingang wie am Ausgang werden die Spaltstoffmengen quantitativ erfaßt. Bei einer in regelmäßigen Zeitabständen aufzustellenden Bilanz rechnet man gegeneinander auf. Bereiche dieser Art werden als Mengenbilanz-Zonen (MBA) bezeichnet.
Eine typische MBA ist zum Beispiel der Fertigungsbereich einer Brennelementfabrik. Man mißt am Eingang den Spaltstoffgehalt und die Menge des zu verarbeitenden Uran- oder Plutonium-Dioxidpulvers. Am Ausgang wird erneut durch zerstörungsfreie Analysemethoden bestimmt, wieviel Spaltstoff die fertigen Brennelemente insgesamt enthalten. Auch die Fabrikationsabfälle werden entsprechend analysiert. Dieser Fabrikationsbereich darf keine weiteren Ein- und Ausgänge haben, und es versteht sich, daß sich die hier arbeitenden Menschen beim Betreten und Verlassen des Fertigungsbereichs einer Kontrolle unterziehen müssen. Da das aus Gründen des Strahlenschutzes ohnehin geschieht, bedeutet das keine besondere Erschwernis.
Eine andere typische MBA ist der Prozeßbereich einer Wiederaufarbeitungs-Anlage. Was hier an Spaltstoffen herauskommt, läßt sich verhältnismäßig einfach analysieren und messen. Schwieriger ist es jedoch am Eingang. Die Menge des in einem Brennelement entstandenen Plutoniums und die Menge des noch vorhandenen U-235 hängen davon ab, wie stark das betreffende Brennelement im Reaktor-Core an den Kernspaltungskettenreaktionen teilgenommen hat, an welcher Stelle des Cores es sich also befand. Da man nicht alle Elemente im einzelnen durchmessen kann, muß man sich hier darauf beschränken, die Messungen erst dann durchzuführen, wenn die Elemente chemisch aufgelöst worden sind. Aus dem gleichen Grund muß man sich am Ausgang eines Kernkraftwerks – einer anderen Mengenbilanz-Zone – auf die rein zahlenmäßige Kontrolle der Brennelemente und auf ihre Identifizierung beschränken. In gleicher Weise verfährt man am Eingang des Kernkraftwerks bei der Brennelement-Anlieferung.
Dieses System sieht bei oberflächlicher Betrachtung ziemlich trivial aus. Worauf es bei ihm ankommt, ist auch gar nicht so sehr das, was man im Fachjargon als

Hardware bezeichnet, also die Meßgeräte und Baumaßnahmen. Entscheidend ist die zugrundeliegende Systemanalyse, die Software. Erst wenn man analysiert hat, wieweit die Messungen an den strategischen Punkten genau sein können und müssen, wie groß möglicherweise der Fehler ist, der durch bestimmte Meßmethoden und Meßgeräte hereinkommt, gewinnt man ein Maß für die Aussagekraft der Bilanz. Ergibt eine solche Analyse, daß die Meßgenauigkeit insgesamt bei plusminus 200 Gramm liegt, darf man sich nicht wundern, wenn hier plötzlich 180 Gramm fehlen.
Diese Erkenntnis ist sowohl für den Kontrollierten wie für die kontrollierende Behörde sehr wichtig. Erscheinen solche Fehlermengen als zu groß, muß man sich vorher überlegen, wie die Meßmethoden verbessert werden können. Die Kontrollinstanz kann nicht hinterher eine Stillegung der betreffenden Anlage verlangen, wenn die voraussehbare Abweichung wirklich eintritt. Solche Streitsituationen zwischen der Kontrollinstanz und der Betriebsleitung der kontrollierten Anlage waren die große Befürchtung der Länder, die, wie die Bundesrepublik Deutschland, nur die friedliche Nutzung der Kernenergie betreiben und als solche im Rahmen des Atomwaffensperrvertrags kontrolliert werden.
Daß das jetzt ausgearbeitete System der Spaltstofffluß-Kontrolle im Prinzip praktikabel ist, wurde vor einiger Zeit in Karlsruhe bei einem Überwachungsexperiment bestätigt, das in einer Fertigungsanlage für plutoniumhaltige Brennstäbe durchgeführt wurde. Es gab vier strategische Meßpunkte, und es ging darum, den Verbleib von etwa 5 Kilogramm Plutonium-Metall bei der Verarbeitung von 200 Kilogramm Mischoxid zu verfolgen. Bei der abschließenden Bilanz stellte das unabhängige Kontrollpersonal fest, daß mit 95prozentiger Wahrscheinlichkeit eine Plutoniummenge verschwunden war, die zwischen 35 und 61 Gramm lag. In der Tat hatte das Personal absichtlich 42 Gramm Plutonium zurückgehalten.
Als Ergebnis des Experiments kam man zu dem Schluß, daß es in der kontrollierten Anlage bei einem jährlichen Durchsatz von 1750 Kilogramm Plutonium möglich ist, ein Verschwinden von 0,5 Kilogramm Plutonium mit 90prozentiger Wahrscheinlichkeit zu entdecken. Die Kosten für den Überwachungsaufwand würden bei dieser ständigen Kontrolle unter 1 Prozent der Fabrikationskosten liegen.
Die Entwicklung der Spaltstofffluß-Kontrolle ist heute genausowenig abgeschlossen wie die Entwicklung des Brennstoffkreislaufs. Darum können auch die Kontrollabkommen, die die IAEO jetzt zur Verifizierung des Atomsperrvertrags schließen muß, nur Rahmenverträge sein, die Platz haben für den jeweils letzten Stand der Kontrolltechnik und Kontrollphilosophie. Andererseits hat gerade diese Kontrollphilosophie wesentlich breitere Bedeutung als nur für den Spaltstofffluß. Auch bei dem Versuch, die Sicherheit von Kernenergieanlagen zahlenmäßig zu erfassen, geht es letztlich darum, Fehlerwahrscheinlichkeiten zu werten.



Zahl der radioaktiven Atome
1
1/2
1/4
1/8
1/16
1/32
1/64
1/128
Kurve des radioaktiven Zerfalls
1
2
3
4
5
6
7
Vielfache der Halbwertszeit

Probleme und Realitäten

Kernkraftwerks-Risiko und Umweltschutz

Würden heute an unsere Verkehrsmittel die gleichen Sicherheitsforderungen gestellt wie an Kernkraftwerke, über Nacht würden unsere Straßen, Flugplätze und Bahnhöfe veröden. Trotzdem muß man die im Zusammenhang mit dem Bau von Kernkraftwerken auftauchenden Fragen der Sicherheit sehr ernst nehmen. Die Spaltprodukt-Menge, die sich in den Brennelementen eines Leistungsreaktors ansammelt – das sind einige hundert Kilogramm bei einem großen, längere Zeit in Betrieb gewesenen Kernkraftwerks-Core – stellt nun einmal potentiell eine erhebliche Gefahr dar. Rein psychologisch kann man schon verstehen, daß manchen Leuten der Gedanke daran höchst unsympathisch ist. Versucht man die Sache nüchtern und im Zusammenhang mit der Umweltbelastung zu sehen, die alle unsere technischen Errungenschaften auslösen, muß man dagegen eigentlich zu dem Schluß kommen, daß die Kernkraft gerade noch rechtzeitig erschlossen wurde, um größeres Übel abzuwenden.

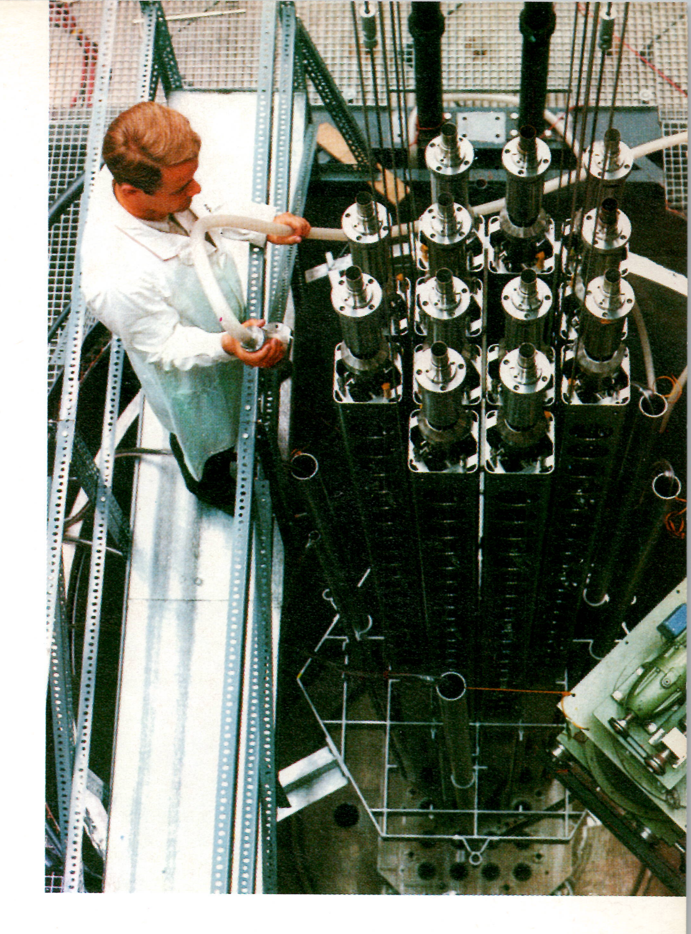
Sicherheit, nicht nur für die Menschen in der Umgebung, sondern auch für die in Kernenergie-Anlagen Tätigen, stand von Anfang an bei der Erschließung der Kernkraft im Vordergrund. Zum Instrumentarium des Strahlenschutzes gehören sogenannte Ganzkörperzähler, eine nach außen sorgfältig abgeschirmte Kammer, in die die Untersuchungsperson in ihrer ganzen Größe geschoben wird. Hochempfindliche Kristallzähler – im Bild an der Decke zu erkennen – tasten die Person ab und registrieren selbst geringfügige Radioaktivitätsmengen, die die betreffende Person bei einem Unglücksfall aufgenommen haben könnte. Diese Stoffe unterliegen in doppelter Weise dem Gesetz der Halbwertszeit, der physikalischen und der biologischen, wie es die Kurve andeutet. Nach einer bestimmten Zeiteinheit ist jeweils die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Aktivität abgebaut. Einerseits geschieht das durch den natürlichen Zerfall der radioaktiven Atome, andererseits durch physiologische Vorgänge. Die aufgenommenen Fremdstoffe werden teils schneller, teils langsamer aus dem Körper herausgeschwemmt.

Das hier zur Diskussion stehende Problem hat drei Seiten. Es geht einerseits um das Unfallrisiko, die Gefahr einer katastrophalen Betriebsstörung, und die dafür vorgesehenen Schutzmaßnahmen. Es geht weiter darum, wieweit der normale Kraftwerksbetrieb gesundheitliche Schädigungen auslösen könnte. Und es geht schließlich um die Wärmeentwicklung der Kernkraftwerke.

GAU – der Größte Anzunehmende Unfall

Wenn man in den USA am Westhang der Rocky Mountains von Idaho Falls aus nach Westen fährt, kommt man in eine Wüste. Im Zentrum dieser Wüste stehen weit verstreut barackenähnliche Bauten, die sich beim Näherkommen als die National Reactor Testing Station, als das große Reaktor-Prüfgelände der amerikanischen Atomenergiekommission entpuppen. Die weit verstreuten Gebäude beherbergen meist kleinere Versuchsreaktoren, mit denen Sicherheitsexperimente gemacht werden. In den fünfziger Jahren hat man hier kleinere Reaktoren verschiedenen Typs absichtlich »hochgehen« lassen, um herauszufinden, was im Extremfall mit einem Reaktor dieser Art passiert.
Daß ein Reaktor unter keinen Umständen zu einer Atombombe werden kann, war schon vorher klar und brauchte nicht bewiesen zu werden. Aber auch die Beschädigungen des Cores erwiesen sich bei diesen Experimenten als bemerkenswert gering. Wohl wurden einzelne Brennelemente verbogen und undicht. Wenn sie vorher länger in Betrieb gewesen wären, hätten sie also sicher einige radioaktive Spaltprodukte an die Umgebung abgegeben. Doch im großen und ganzen blieb die Verpackung des Kernbrennstoffs intakt.
Wenn heute für große Kernkraftwerke Sicherheitsphilosophien entwickelt werden, geht man über diese experimentell gewonnenen Erkenntnisse weit hinaus. Mitunter hat es den Anschein, als werde das Ersinnen neuer Stör- und Unfallmöglichkeiten wie ein intellektuelles Spiel betrieben, bei dem es nur darauf ankomme, möglichst schaurige Kombinationen zu ersinnen, auch wenn die Wahrscheinlichkeit für deren Auftreten nahezu Null beträgt. Leider läßt sich bei großen Kernkraftwerken jedoch nicht mehr der experimentelle Beweis erbringen, daß die so konstruierten Schreckgespenster unrealistisch sind. Man kann dazu ja nicht ein ganzes Kernkraftwerk absichtlich »hochgehen« lassen.
Der Größte Anzunehmende Unfall (GAU), von dem alle Risiko-Betrachtungen ausgehen, besteht bei den Wasserreaktoren darin, daß im primären Kühlkreislauf ein Rohr platzt. Als Folge davon entweicht das Kühlmittel, und es besteht die Gefahr, daß der Kern austrocknet und nicht mehr gekühlt werden kann. Dieses Unfallgeschehen läuft nicht so schnell, als daß es nicht möglich wäre, die unter Federdruck stehenden Kontrollstäbe auszulösen und in den Reaktorkern hineinzu-

Blick in eine Prüfanlage für neugefertigte Brennelemente von Leistungsreaktoren, eine sogenannte Kritische Anordnung. Sobald der Tank mit Wasser gefüllt ist, wird die Anordnung zu einem Reaktor sehr geringer Leistung, und man kann zum Beispiel die gleichmäßige Verteilung des Brennstoffs in den Elementen oder die Wirksamkeit von Absorberstäben zur Steuerung des Reaktors prüfen.



schießen. Dadurch werden die Kernspaltungs-Kettenreaktionen gestoppt, von dorther kommt also keine weitere Wärmeenergie mehr. Außerdem hören die Kettenreaktionen von selbst auf, wenn das moderierende Wasser nicht mehr zwischen den Brennelementen ist.

Doch die Wärmeentwicklung der davon nicht berührten radioaktiven Zerfallsprozesse geht weiter. Diese »Nachwärme« erreicht in den ersten Sekunden noch 5 Prozent der thermischen Nennleistung und kann den Reaktorkern so erhitzen, daß die Brennelemente platzen und möglicherweise sogar schmelzen. So braucht man also Notkühlungssysteme, die in jedem Fall ausreichen, um die Zerfallswärme abzuführen. Bei einem Notkühlungssystem dieser Art gibt es Wasserbehälter, die unter Gasdruck stehen. Sie können ihr Wasser in den Reaktorkern spritzen, ohne daß dazu eine – wegen Stromausfalls möglicherweise nicht betriebsfähige – Pumpe notwendig wäre. Vier solcher Systeme baut man ein, doch wenn nur zwei davon später funktionieren, reicht das voll aus. Andere Notkühlungssysteme arbeiten mit Pumpen, die über eine Notstromanlage versorgt werden. So sollte also selbst bei einem GAU die gesamte Radioaktivität der Spaltprodukte in den Brennelementen oder zumindest im stählernen Reaktorgefäß eingeschlossen bleiben.

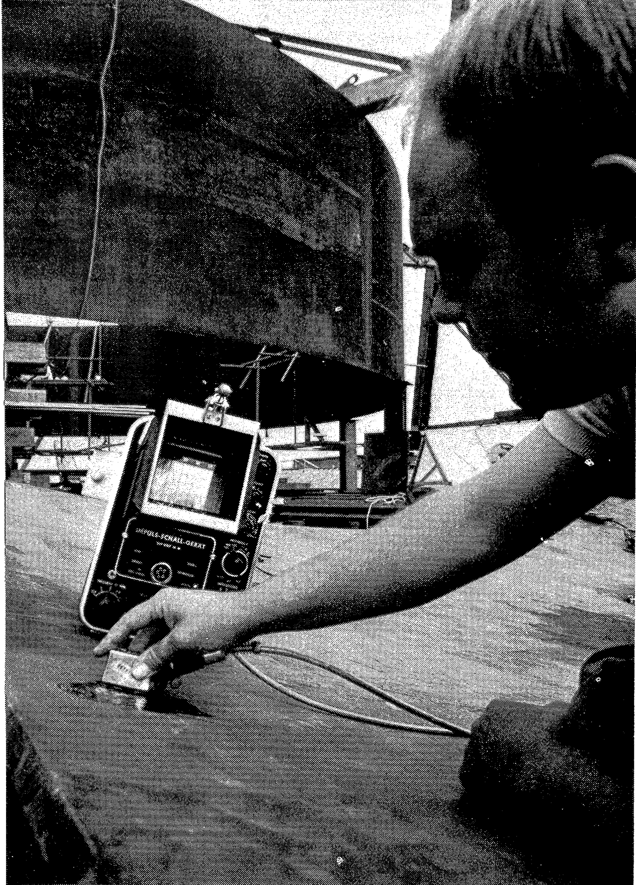
Daß das wirklich gelingt, daran ist auch die Stromversorgungsgesellschaft, die das

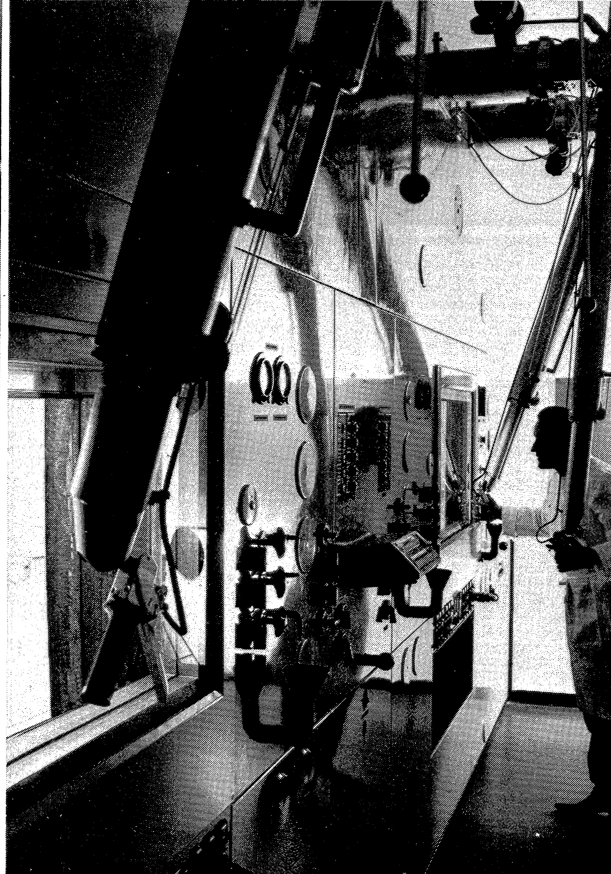
Kernkraftwerk betreibt, in hohem Maße interessiert. Nur dann kann man ziemlich schnell an den Reaktor-Druckbehälter heran, um das geplatzte Rohr zu flicken und das Kraftwerk nach einigen Wochen oder wenigen Monaten wieder in Betrieb zu setzen. Würden die Brennelemente in größerem Umfang beschädigt, brauchte man ein neues Core, und es dürfte viele Monate dauern, bis Menschen zur Reparatur in die Nähe des Reaktors kommen können. Möglicherweise wäre ein jahrelanger Stillstand des Kernkraftwerks die Folge.

Für die Umwelt, für die Bewohner in unmittelbarer Nachbarschaft des Kernkraftwerks, bestünde aber auch dann noch keinerlei Gefahr. Der Reaktor und – bei Druckwasser-Reaktoren – die Dampferzeuger sind von einer kugelförmigen druckfesten stählernen Schale umgeben, die bei Druckwasser-Reaktoren und älteren Siedewasser-Kernkraftwerken mit dem Reaktorgebäude identisch ist und ihm die charakteristische runde oder zylindrische Form gibt. Diese stählerne Hülle hält ohne weiteres dem bei einem Rohrreißer im Innern der Reaktorhalle auftretenden Dampfdruck stand. Damit sie nicht durch Teile eines platzenden Dampferzeugers und ähnlicher druckführender Anlagenteile beschädigt werden kann, sind diese innerhalb der Druckschale von dicken Betonwänden umgeben. Wenn Spaltprodukte aus den Brennelementen herauskämen und auch nicht im Druckgefäß des Reaktors eingeschlossen blieben, würden sie also durch diese äußere stählerne Hülle des Reaktorgebäudes – im Fachjargon als Containment bezeichnet – gestoppt.

Sollte auch dieses Containment nicht dicht bleiben, bestünde immer noch keine unmittelbare Gefahr für die Umgebung, denn die Stahlhülle des Containments ist wiederum von einer Betonschale, von einem Betongebäude umgeben, und im Raum dazwischen herrscht ständig Unterdruck. Die austretende Radioaktivität würde also abgesaugt und zum weitaus größten Teil in den dafür eingerichteten Filtern der Abluftanlage des Kernkraftwerks gebunden. Erst wenn auch noch die Abluftanlage versagen sollte, bestünde vielleicht Anlaß, die Menschen in der Umgebung zu evakuieren. Wirklich gefährlich könnte die Sache aber auch dann erst werden, wenn jetzt obendrein noch tagelang Windstille und eine für den berüchtigten Smog typische Wetterlage herrschen würde, eine beständige Inversionsschicht, die über der Erde hängt und alle Abgase festhält. Dann erst könnte sich eine gesundheitsgefährdende radioaktive Wolke bilden.

Es müssen also mehrere, hier nur zum Teil genannte, unabhängige Sicherheitseinrichtungen gleichzeitig versagen und weitere unglückliche Zufälle zusammenkommen, damit sich ein GAU so extrem entwickeln kann. Die Betonung liegt dabei auf dem Wort gleichzeitig. In der Technik kann man nie absolute Sicherheit garantieren, höchstens eine an sie mit großer Wahrscheinlichkeit heranreichende Zuverlässigkeit, denn bei jeder technischen Einrichtung bleibt immer ein winziger Rest von Ungewißheit, daß sie richtig funktioniert. Kombiniert man mehrere





Links: Schweißnaht-Prüfung beim Bau des Kernkraftwerks Würgassen. Wie beim Radar ortet der Ultraschallkopf Schweißfehler, die später zum Reißen der Schweißnaht führen könnten. Prüfungen dieser Art sind eine wichtige Voraussetzung für die spätere Betriebssicherheit.

Rechts: Eingehende metallurgische Untersuchungen von Brennelementproben in Heißen Zellen sind ein wichtiger Teil des Sicherheits-Entwicklungsprogramms von Kernkraftwerken. Die Zellen sind mit allen notwendigen Bearbeitungs- und Meßgeräten ausgerüstet, die aber zum Schutz der damit arbeitenden Menschen über Manipulatoren fernbedient werden müssen.

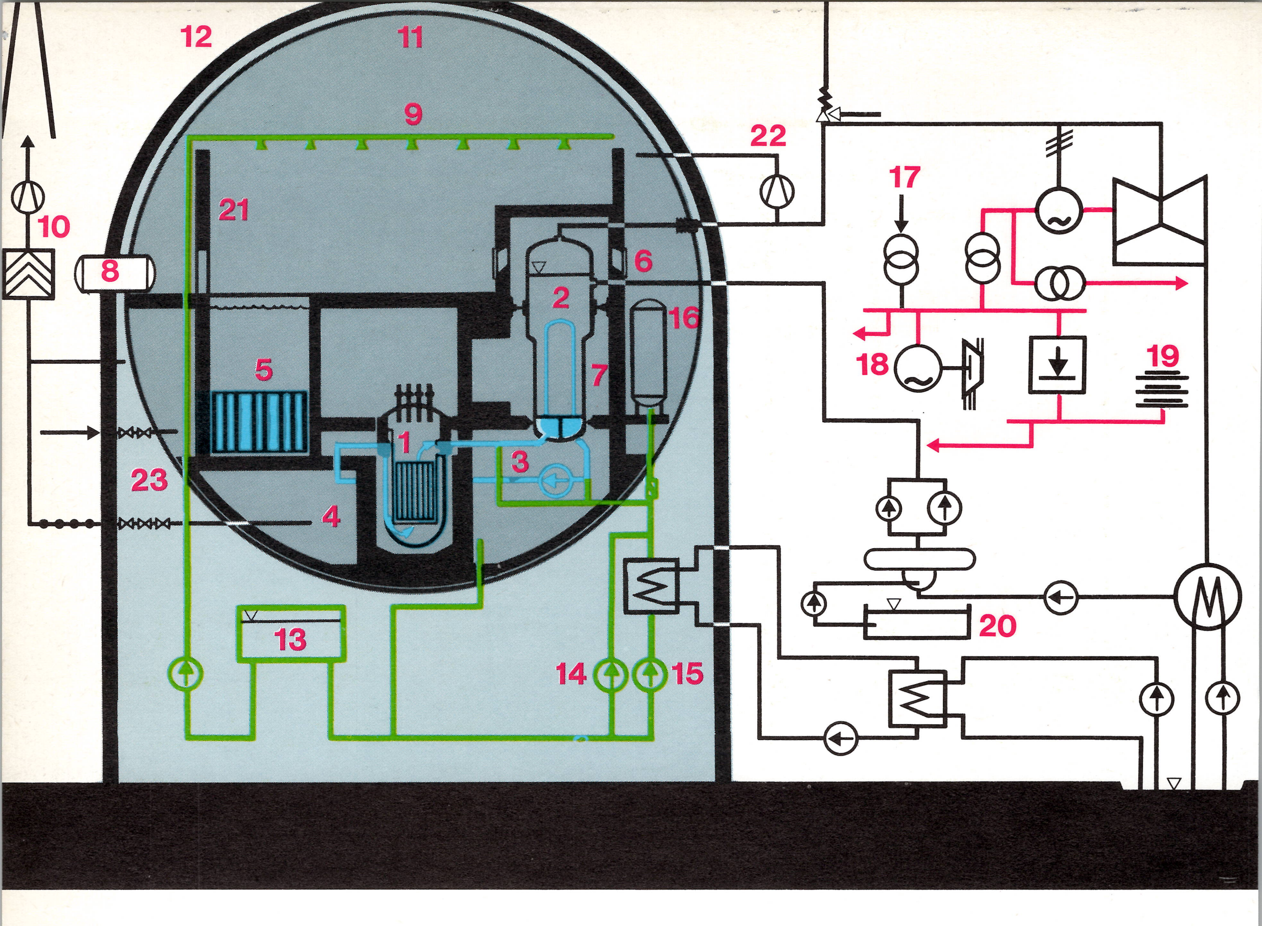
technische Einrichtungen derart, daß zur Sicherheit nur eine funktionieren muß, wird die Zuverlässigkeit extrem gesteigert, denn die Wahrscheinlichkeit für den gleichzeitigen Ausfall aller Sicherheitseinrichtungen ist extrem klein. Doch mit absoluter Sicherheit läßt auch sie sich nicht ausschließen. Es bleibt also immer noch ein winziger theoretischer Gefährdungsrest, den die verantwortlichen Ingenieure und Mathematiker nicht einfach unter den Tisch fallen lassen mögen.

Wer es sich in den Kopf gesetzt hat, die Kernkraft zu verteufeln, den mögen auch solche Überlegungen nicht überzeugen. Da alle hypothetischen Störfälle teils mehr, teils weniger auf Spekulationen beruhen, sind bei ihnen der Phantasie weite Grenzen gesetzt.

Radioaktivitäts-Freisetzung bei normalem Betrieb

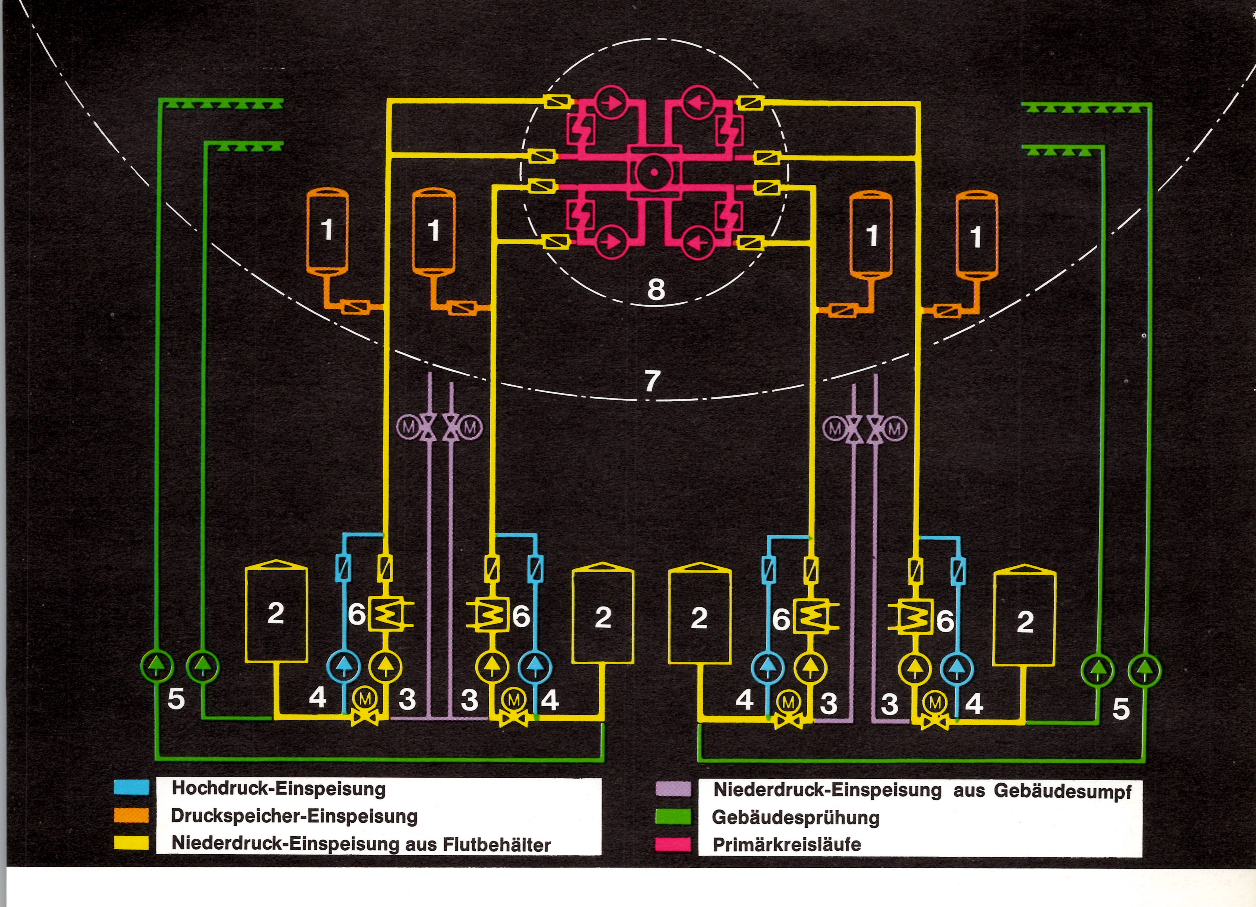
Glücklicherweise kann sich die Sicherheitsphilosophie bei normalem Kernkraftwerk-Betrieb mehr auf Tatsachen stützen. Aber es gibt auch hier einige nicht ganz geklärte, zur Spekulation verleitende Punkte, über die schwer endgültig zu entscheiden ist, weil man ja nicht mit Menschen experimentieren kann.
Kernkraftwerke der heutigen Generation geben während des Betriebs minimale Mengen gasförmiger Radioaktivität durch einen Abluftschornstein und gelegentlich auch etwas flüssige Radioaktivität mit dem Kühlwasser ab. Diese Radioaktivitätsabgabe wird in der Bundesrepublik Deutschland von den Genehmigungsbehörden auf Grenzwerte beschränkt, die unter den höchstzulässigen Werten der Euratom-Grundnorm und der 1. Strahlenschutzverordnung liegen. Aber selbst diese niedrigen Richtwerte werden von den Kernkraftwerken im Normalbetrieb nur zu einem Bruchteil ausgeschöpft und höchstens bei kleineren Betriebsstörungen einmal für kurze Zeit erreicht. Diesen in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Höchstkonzentrationen und Höchstmengen liegt die Philosophie zugrunde, daß sie die ohnehin vorhandene natürliche Strahlenbelastung des Menschen – etwa durch die kosmische Strahlung und durch die natürliche Radioaktivität – maximal verdoppeln. Tatsächlich liegt die derzeitige zusätzliche Strahlenbelastung der Bevölkerung durch Ableitung radioaktiver Stoffe aus Reaktoren jedoch weit unter 1 Prozent der natürlichen Strahlenbelastung. Mit der natürlichen lebt das Menschengeschlecht seit Urzeiten ohne erkennbare Beeinträchtigung, und es ist sicher vernünftig anzunehmen, daß das Wagnis einer gewissen Erhöhung der natürlichen Strahlenbelastung durch Hinzufügung künstlicher Radioaktivität hinreichend klein ist gegenüber dem damit erzielbaren Nutzen und Gewinn. Bei Pflanzen kann man sogar im Experiment zeigen, daß eine ständige zusätzliche Bestrahlung das Wachstum fördert, und es gibt Theorien, wonach die genetische und biologische Evolution vor allem durch die natürliche Strahlenbelastung stimuliert wird, daß also die Entwicklung des Lebens auf der Erde ohne Strahlung gar nicht in der heutigen Vielfalt möglich gewesen wäre.
Trotzdem werden die in den Strahlenschutzvorschriften fixierten höchstzulässigen Werte – so niedrig sie auch aus der Sicht der meisten Strahlenbiologen angesetzt sein mögen – seit einiger Zeit durch zwei amerikanische Wissenschaftler, Dr. John Gofman und Dr. Arthur Tamplin, unter Benutzung recht spektakulärer Zahlen

angegriffen. So behauptet Gofman, in den USA würden pro Jahr 32000 Menschen mehr an Leukämie und Krebs sterben, wenn die gesamte US-Bevölkerung einmal wirklich der offiziell zulässigen Strahlenhöchstbelastung ausgesetzt wäre. Er spricht von über 1 Million Extra-Todesfällen pro Jahr als Folge von Erbschäden.
Gegen diese Zahlen läßt sich sehr viel anführen, doch der Kern des Problems, daß selbst sehr geringe zusätzliche Strahlendosen möglicherweise sogenannte Strahlenspätschäden und genetische Schäden auslösen können, bleibt bestehen. Es gibt für diese Schäden keine Beweise, sondern nur Vermutungen. Da bei ihnen aber auch nicht der Gegenbeweis möglich ist, kann man sie nicht einfach abtun.
Bei den sogenannten Strahlenspätschäden handelt es sich nicht um neuartige Krankheitsbilder, sondern nur um eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von ohnehin spontan vorkommenden Erkrankungen, deren tiefere Ursachen man nicht kennt. Es geht hier um die Entstehung bösartiger Geschwülste und bösartiger Blutkrankheiten, also Krebs und Leukämie. Beim Krebs ist nicht geklärt, wieweit die natürliche Strahlenbelastung zu seinem Auftreten beitragen kann, aber aus Sicherheitsgründen unterstellt man, daß es für die Krebsentstehung keine untere Wirkungsschwelle gibt. Bei der Leukämie läßt sich nachweisen, daß mit steigender Strahlenbelastung auch die Erkrankungswahrscheinlichkeit proportional ansteigt. Doch diese im Tierversuch gewonnenen Ergebnisse basieren notgedrungen auf höheren Bestrahlungen, als sie bei der natürlichen Strahlenbelastung vorliegen. Wieweit diese Ergebnisse bis in diesen schwachen Bereich hinein extrapoliert werden können, ist nicht endgültig entschieden. Bei bestimmten Strahlenspätschäden, wie etwa Unfruchtbarkeit, grauer Star oder Wachstumsstörungen, weiß man mit Sicherheit, daß sie erst nach Überschreiten einer bestimmten Grenzdosis auftreten. Sie scheiden bei dieser Betrachtung aus.
Unterstellt man, daß schwache Bestrahlungsdosen noch wirksam sind, dann kann man errechnen, daß bereits die natürliche Strahlenbelastung für 2 Prozent aller spontan auftretenden Leukämiefälle verantwortlich ist. Dann führt eine künstliche Erhöhung dieser natürlichen Belastung um 20 Prozent – um einmal ein Beispiel zu nennen – zu einer Erhöhung der spontan auftretenden Leukämiefälle um 0,4 Prozent. Beim Krebs könnte die natürliche Strahlenbelastung für etwa 0,5 Prozent aller spontan auftretenden Fälle verantwortlich gemacht werden, so daß eine Erhöhung der natürlichen Belastung um 20 Prozent zu einer Vermehrung der spontanen Krebsfälle um 0,1 Prozent führen würde. Wenn man solche minimalen Prozentwerte mit großen Bevölkerungszahlen multipliziert, kommt man leicht zu erschreckenden Absolutwerten.
In bezug auf genetische Schäden ist nie von Fachleuten behauptet worden, daß es eine untere Sicherheitsschwelle gäbe, daß also unterhalb einer gewissen Strahlenbelastung keine Mutationen mehr durch Strahlung erzeugt würden. Doch quantitative Angaben über strahleninduzierte Mutationsraten beim Menschen sind immer



Sicherheitstechnische Einrichtungen für Druckwasser-Reaktoren. Neben der Notstromversorgung und dem sicheren Gebäudeabschluß gehören dazu vor allem die Einrichtungen zur Sicherheitseinspeisung und Noteinspeisung von Kühlwasser sowie das teils elektronisch und teils mechanisch wirkende Reaktorschutzsystem, das die Schnellabschaltung des Reaktors (RESA) auslöst.

1 Reaktor 2 Dampferzeuger 3 Hauptkühlmittelpumpe 4 Biologischer Schild 5 Brennelement-Becken 6 Überströmöffnung 7 Dampferzeuger-Abstützung 8 Materialschleuse 9 Gebäudesprüheinrichtung 10 Ringraumabsaugung 11 Sicherheitshülle 12 Sekundärabschirmung 13 Borwasser-Flutbehälter (4 × 50%) 14 HD-Sicherheitseinspeisepumpe (4 × 50%) 15 ND-Sicherheitseinspeisepumpe und Nachwärmekühler (4 × 50%) 16 Druckspeicher (4 × 50%) 17 Anfahrnetz-Einspeisung 18 Notstrom-Dieselgenerator (4 × 50%) 19 Batterie (2 × 100%) 20 Deionatbecken 21 Trümmerschutzzylinder 22 Rückpumpeinrichtung 23 Unterdruckhaltung



Sicherheits-Einspeisesystem bei Druckwasser-Reaktoren. Als Beispiel für die bei sicherheitstechnischen Einrichtungen übliche Redundanz (Mehrfachabsicherung). Alle Systeme sind vierfach vorhanden, doch bereits zwei Systeme reichen für den gewünschten Effekt voll aus.

Oben:
1 Druckspeicher 2 Borwasser-Flutbehälter 3 ND-Einspeisepumpe 4 HD-Einspeisepumpe 5 Sprühpumpe 6 Nachkühler 7 Beton-Abschirmzylinder 8 Sicherheitshülle

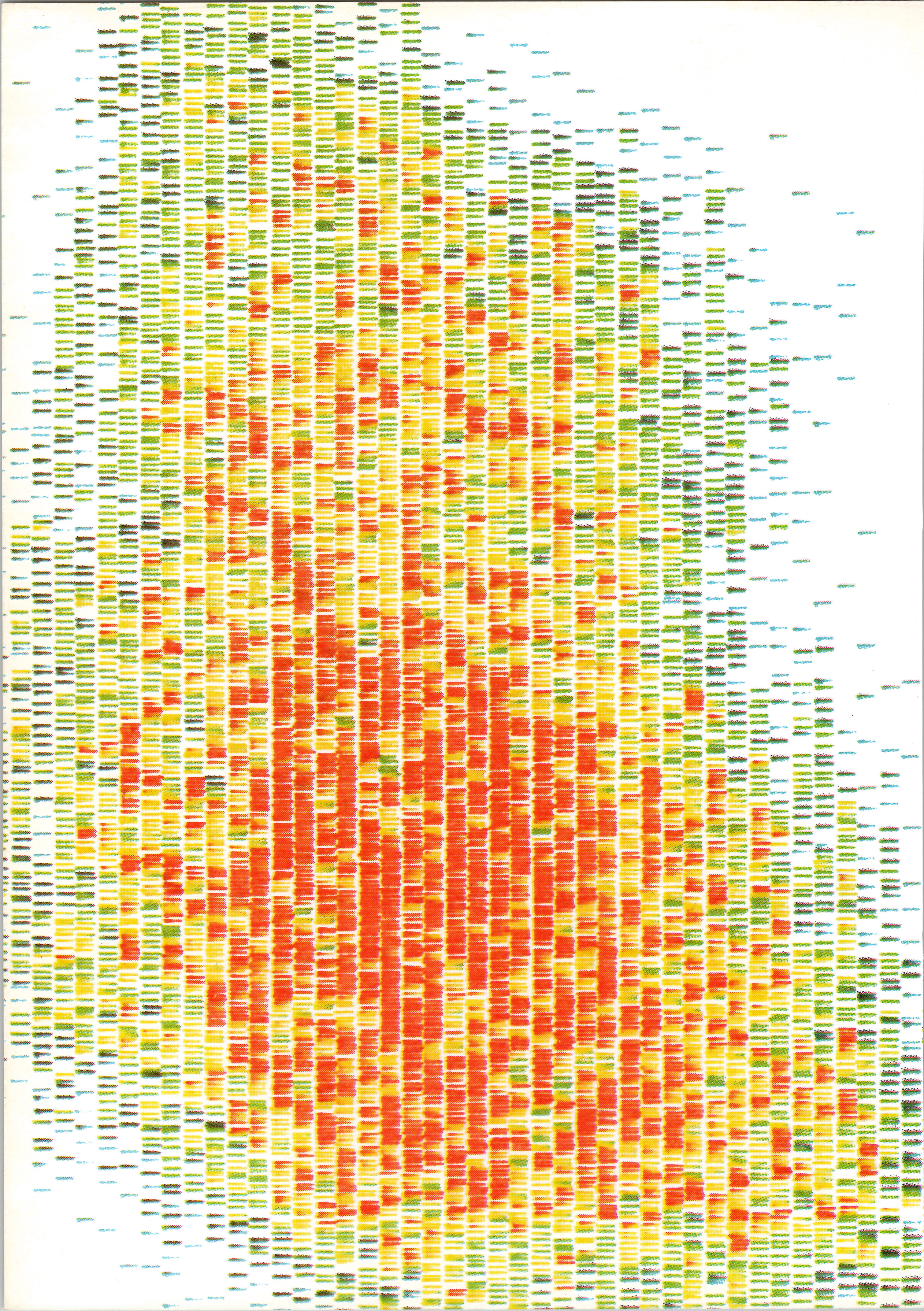
noch sehr unsicher. Daraus eine zusätzliche Todesrate zu errechnen, ist äußerst gewagt. Allenfalls kann man auf lange Sicht von einer gewissen Verschlechterung des Erbguts der Gesamtbevölkerung sprechen. Darüber zu diskutieren, erscheint jedoch fast als Ironie angesichts der vielen anderen Zivilisationseinflüsse, die heute in allen Industriestaaten zu einer viel tiefer greifenden Erbgutveränderung führen. Im übrigen ist es heute durchaus kein technisches Problem mehr, bei Kernkraftwerken die geringe Aktivitätsabgabe ganz zu vermeiden. Eine deutsche Firma bietet Anlagen an, in denen die heute noch an die Atmosphäre und an das Kühlwasser abgegebenen Spaltprodukte sich zu einem vernünftigen Preis konzentrieren lassen, so daß man sie dann in fester Form abtransportieren kann. Auch für die radioaktiven Edelgase, vor allem das Krypton-85, die bisher vor allem von Anreicherungsanlagen an die Atmosphäre abgegeben werden, gibt es heute Absorptionstechniken.

Die nicht unberechtigte Angst mancher Zeitgenossen, durch Unachtsamkeit oder Schlamperei könne trotzdem Aktivität in gefährlichen Mengen in die Umgebung gelangen – solche Fälle hat es gegeben –, läßt sich durch plombierte Kontrolleinrichtungen mit Sicherheit vermeiden. Ihren Einbau zu fordern, ist durchaus berechtigt. Natürlich kostet das alles etwas, doch die Kernkraftnutzung wird dadurch nicht gleich unwirtschaftlich. So ausgestattet, könnten Kernkraftwerke auch in Ballungsgebieten errichtet werden, unmittelbar am Rand der großen Städte und inmitten großer Industriebetriebe.

Wohin mit der Abfallwärme?

Nüchtern betrachtet bleibt also von den Argumenten, die in der großen Umweltdiskussion gelegentlich gegen die Kernkraftwerke ins Feld geführt werden, nur das der erhöhten Wärmebelastung unserer Flüsse. In der Tat ist der Kühlwasserbedarf bei den heutigen Kernkraftwerken um etwa 35 Prozent höher als bei modernen Öl- und Kohlekraftwerken, und gerade bei den heutigen Kernkraftwerken ist die der Turbine zur Verfügung stehende Temperaturspanne so klein, daß bei der Verwendung von Kühltürmen erheblichere Wirkungsgradverschlechterungen zu verkraften sind. Paradoxerweise ist dieser Nachteil zu einem guten Teil eine direkte Folge des sonst so vorbildlichen Umweltverhaltens der Kernkraftwerke. Öl- und Kohlekraftwerke blasen einen erheblichen Teil der von ihnen erzeugten Abfallwärme mit den Verbrennungsgasen aus den Schornsteinen hinaus. Kernkraftwerke müssen alle ihre Abwärme mit dem Kühlwasser abführen. Außerdem fällt bei den heutigen Wasserreaktoren mit ihren niedrigeren Dampftemperaturen und dem daraus resultierenden schlechteren Wirkungsgrad schon aus grundsätzlichen physikalischen Gründen je erzeugter Kilowattstunde mehr Abfallwärme an

als bei modernen Kohle- und Ölkraftwerken oder bei künftigen Hochtemperatur- und Brüter-Kernenergieanlagen.
Nun wäre die Aufheizung unserer Flüsse nicht so schlimm, müßten diese nicht auch sonst noch allerhand verkraften. Die spezielle Situation der mitteleuropäischen Flüsse entsteht dadurch, daß in ihrem Wasser der Gehalt an gelöstem Sauerstoff zu gering ist gegenüber den Schmutzstoffen, die sie abbauen sollen. Dabei kann eine Erwärmung des Wassers von Vorteil sein, solange die Menge der zu verarbeitenden Verunreinigungen nicht zu groß ist. Dann beschleunigt die Erwärmung den Abbau, ohne daß dabei der Sauerstoffgehalt des Wassers in Anspruch genommen wird. Bei starker Verschmutzung führt die Erwärmung jedoch zu einer zunehmenden Aktivität von sauerstoffverbrauchenden Bakterien. Wenn sie den Sauerstoffgehalt aufgebraucht haben, kommt es zum sogenannten Umkippen des Gewässers. Dieses ist dann auch nicht biologisch tot, aber den Abbau der Schmutzstoffe übernehmen nun Mikroorganismen, die ohne Sauerstoff leben und die die für Kläranlagen typischen Gerüche erzeugen.
Selbst bei niedrigen Sauerstoffwerten gilt eine Erhöhung der Flußwassertemperatur um 3 bis 5 Grad Celsius als unerheblich und ist ohne Einfluß auf den Gewässerzustand. Man kommt für alle Flüsse der Bundesrepublik Deutschland auf eine Kühlleistung, die für Kernkraftwerke von insgesamt 17000 MW elektrischer Leistung ausreicht. Geht man von einer maximalen Aufheizung bis 25 Grad Celsius aus, dann läßt sich eine maximale Kernkraftwerksleistung von 34000 MW errechnen, also der doppelte Wert. Die Kühlleistungs-Kapazität der deutschen Flüsse steht der Bundesrepublik jedoch nicht allein zur Verfügung. Sie muß zu einem gewissen Teil mit den Nachbarländern geteilt werden, zum Beispiel mit der Schweiz, Frankreich und Holland im Falle des Rheins.



Für die Dritte Welt

Kerntechniken – nicht nur zur Stromerzeugung

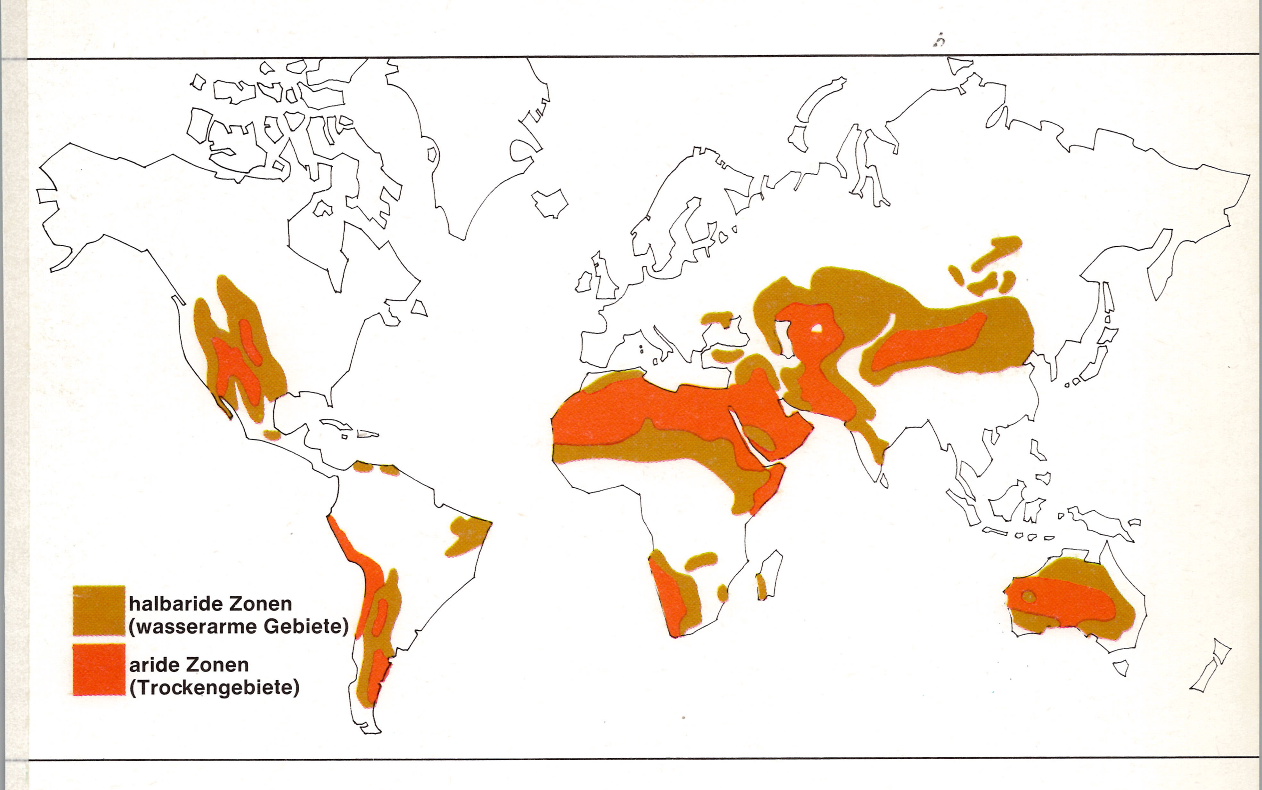
Schon immer spielte bei der Erschließung der Kernkraft ein wenig schlechtes Gewissen mit. Als sich Ost und West 1955 gleichermaßen entschlossen, durch Beseitigung aller bis dahin bestehenden Geheimhaltungsvorschriften der Entwicklung einer zivilen Kerntechnik den entscheidenden Impuls zu geben, stand dahinter neben manchen politischen Überlegungen auch das schlechte Gewissen wegen der bisher in der Kernwaffenentwicklung gesteckten Milliardenbeträge. Es war einfach nicht mehr zu verantworten, der Menschheit weiterhin die Segnungen einer neuen Energiequelle vorzuenthalten, deren Grundlagen zur allgemeinen Nutzung seit Jahren bereitlagen. Heute gilt das schlechte Gewissen mehr dem Mißverhältnis, das vorerst noch zwischen den reichen und den armen Ländern als potentielle Nutznießer der Kernkraft besteht. Zwar hat die Erschließung der Kernkraft die hochindustrialisierten Länder bisher erheblich mehr gekostet, als der schon jetzt erzielbare wirtschaftliche Nutzen ausmacht. Doch es ist abzusehen, daß diese Bilanz bald positiv wird. Dann aber werden gerade die reichen Länder die Hauptnutznießer sein, denn sie haben viel eher Einsatzmöglichkeiten für die billig arbeitenden großen Kernkraftwerke. Andererseits bieten sich gerade für die Entwicklungsländer verschiedene neue Kerntechniken an, die nicht unmittelbar auf die Stromerzeugung ausgerichtet sind, aber besonders diesen Ländern bei der Lösung ihrer speziellen Probleme entscheidend helfen können.

Die Darstellung bestimmter Körperfunktionen oder krankhafter Veränderungen mit der Hilfe radioaktiver Isotope zählt zu den modernsten Methoden medizinischer Diagnostik. Das dem Patienten eingegebene, radioaktiv markierte Mittel reichert sich in bestimmten Organen an. Zähler tasten die in Frage kommenden Stellen »Zeile für Zeile« ab, und als Ergebnis erhält der Arzt einen farbigen Ausdruck, in dem die räumliche Verteilung unterschiedlicher Aktivitäten für mehrere Isotope durch die unterschiedlichen Farben und die Dichte der Striche markiert ist.

Die Kernspaltungs-Kettenreaktionen, die in einem Reaktor ablaufen, erzeugen ja zunächst nur Wärme. Kernreaktoren sind neuartige Öfen. Da elektrischer Strom diejenige Form ist, in der man Energie über größere Entfernungen transportieren und universell einsetzen kann, liegt es nahe, die Wärme der neuartigen Öfen an erster Stelle zur Stromerzeugung zu benutzen. Doch man kann ihre Wärme natürlich auch direkt einsetzen, etwa zur Destillation von Salzwasser, für chemische Prozesse, in der Metallverhüttung oder auch zum Antrieb von Schiffen.
Außerdem bietet die Kernkraft die Nutzung von Strahlenwirkungen an. Die bei Kernspaltungs-Kettenreaktionen verlorengehenden Neutronen können die Atomkerne bestimmter chemischer Elemente so in Unordnung bringen, daß diese radioaktiv werden und dann außerhalb des Reaktors ihrerseits Strahlung aussenden. Diese Strahlung kann chemisch, biologisch und physiologisch wirken, sie kann aber auch einfach dazu dienen, vom Vorhandensein oder Fehlen bestimmter Elemente Kunde zu geben. Auch die beim radioaktiven Zerfall entstehende Wärme kann man in stromerzeugenden Isotopen- oder Radionuklid-Batterien technisch nutzen.

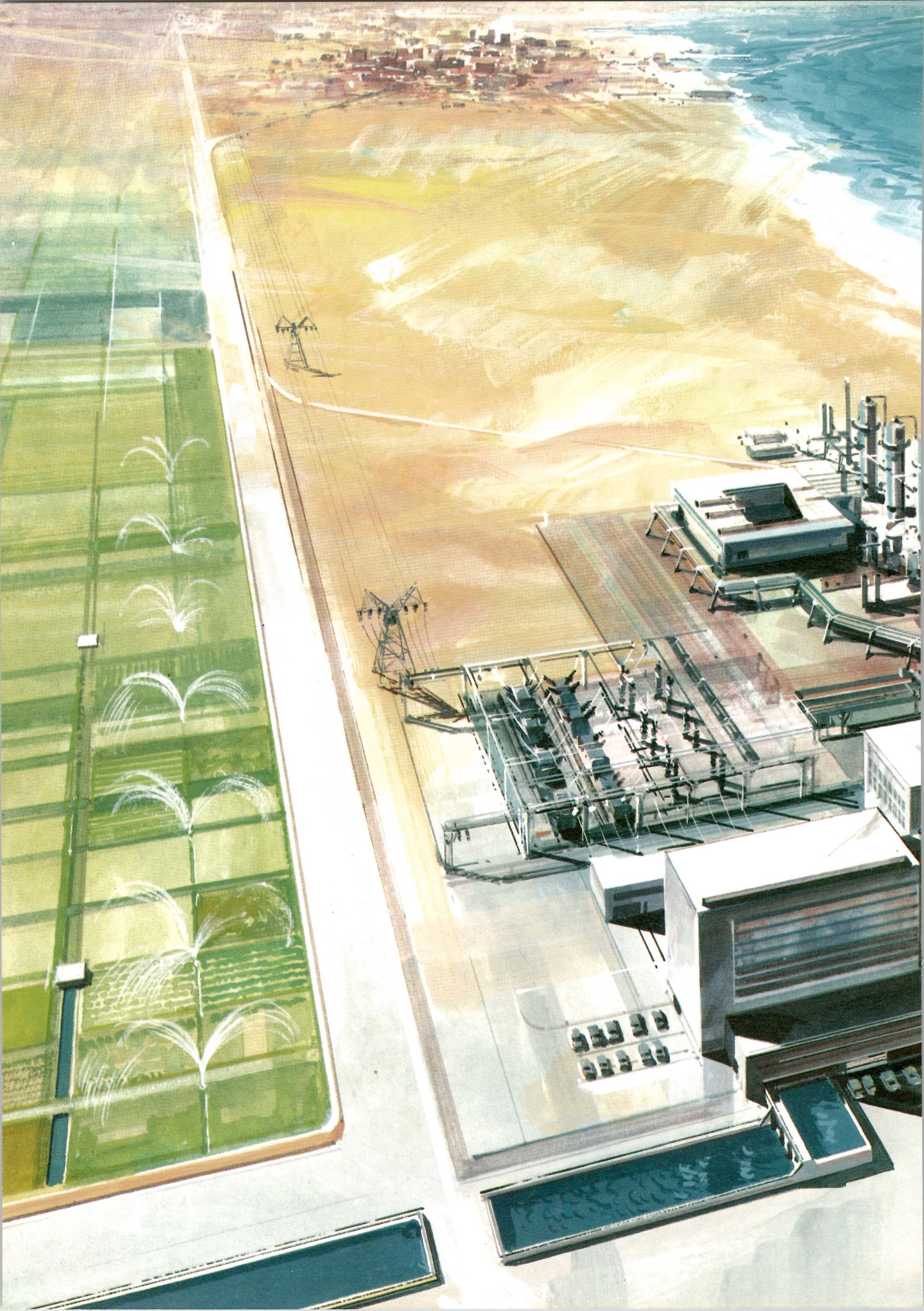
Agro-industrielle Zentren in der Wüste

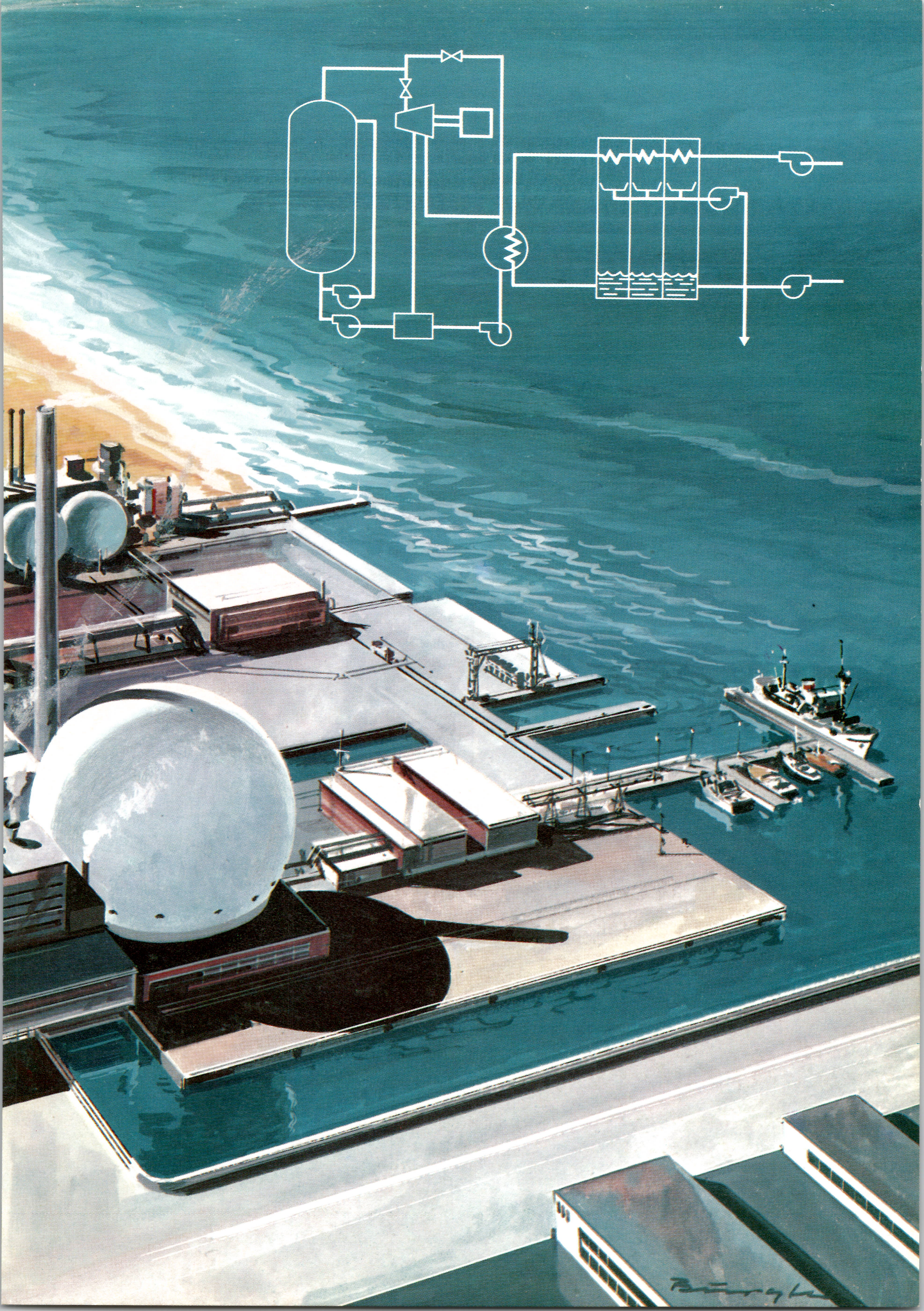
Schon in den hochindustrialisierten Ländern entwickelt sich die Bereitstellung von preiswertem Wasser mehr und mehr zu einem Schlüsselproblem des wirtschaftlichen Wachstums. In den Entwicklungsländern spielt das Wasser vielfach überhaupt die entscheidende Rolle schlechthin. Wo ein großer Teil der Bevölkerung am unteren Existenzminimum lebt, kommt es vor allem darauf an, die landwirtschaftliche Produktion zu steigern und neue Anbauflächen zu erschließen. Der dazu benötigte Grund und Boden ist oft vorhanden, doch nur durch die Zuführung von Wasser läßt er sich auch nutzen. Zum Beispiel bestehen die Wüsten der arabischen Länder nur zum kleineren Teil aus wirklich unfruchtbaren Sandgebieten. Oft handelt es sich dabei um normalen, nur ausgetrockneten Boden, auf dem es sofort zu wachsen und blühen beginnt, wenn man ihm Wasser zuführt. Viel wichtiger als preisgünstiger elektrischer Strom ist für diese Bereiche der Erde die Gewinnung von entsalztem Wasser. Wichtiger als stromerzeugende Kernkraftwerke wären also für diese Länder Meerwasser-Entsalzungsanlagen, die mit billiger Kernenergie billiges Süßwasser liefern. Daß es solche Anlagen heute noch nicht gibt, hat vor allem ökonomische Gründe.
Das Destillieren von Wasser, wie es auf Schiffen und kleinen bewohnten Inseln seit Jahrzehnten betrieben wird, verlangt einen erheblichen Einsatz von Wärme und ist dementsprechend teuer. So wurden Stufenprozesse entwickelt, bei denen die Ausnutzung der Wärme in vielen Schritten erfolgt und so eine wesentlich bessere



Der Wüstengürtel der Erde und die anschließenden halbariden Zonen, in denen nur unregelmäßig Regen fällt und Grundwasser sehr knapp ist, bilden zusammen 60 Prozent der freien Erdoberfläche. Doch nur 5 Prozent der Weltbevölkerung leben hier. Abhilfe ist nur durch künstliche Bewässerung möglich, die Meerwasserentsalzung in großem Stil verlangt.

Seiten 110/111: Wirtschaftlich tragbare Meerwasser-Entsalzung mit Hilfe der Kernenergie hat zur Voraussetzung, daß gleichzeitig auch elektrischer Strom erzeugt wird und sinnvoll eingesetzt werden kann. Darum wird man in Zukunft in meernahen Wüstengebieten agro-industrielle Komplexe errichten, in denen eine große Kernenergieanlage das Herzstück für chemische und industrielle Betriebe, landwirtschaftliche Kulturen und Wohnsiedlungen ist. An der Südostküste des Mittelmeers bestehen zum Beispiel recht gute Voraussetzungen für die Anlage solcher Komplexe.





Nutzung der Wärme erreicht wird. Dadurch konnten die Wassererzeugungspreise von Entsalzungsanlagen im Verlauf der letzten 20 Jahre etwa auf ein Viertel ihres ursprünglichen Niveaus reduziert werden. Doch mit knapp 1 DM pro Kubikmeter liegen sie für eine landwirtschaftliche Nutzung immer noch viel zu hoch. Erst wenn man auf 10 bis 20 Pfennig je Kubikmeter herunterkommt, läßt sich dieses Wasser in hochwertigen Pflanzenkulturen einsetzen. Mitte der achtziger Jahre soll es nach Ansicht der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) so weit sein.

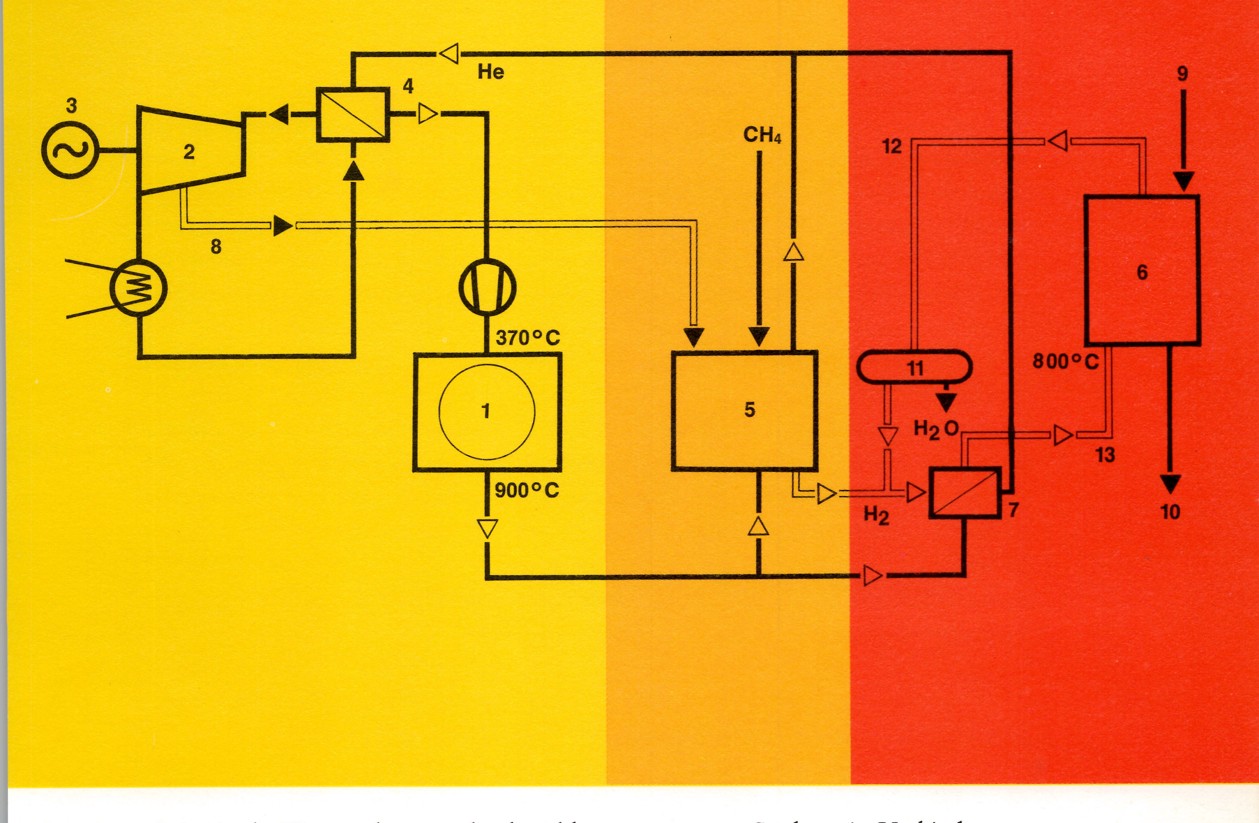
In Israel, Mexiko und Ägypten hat man mit ausländischer Beteiligung wiederholt Studien für die Errichtung großer nuklearer Entsalzungsanlagen oder für Doppelzweckanlagen, also Entsalzung und Stromerzeugung, ausgearbeitet. Bisher ist es jedoch zu einer Verwirklichung dieser Pläne nicht gekommen. Allein in der Sowjetunion, in Chewtchenkow, wird seit einigen Jahren an einer Doppelzweckanlage gebaut, die bei einer elektrischen Leistung von 150 bis 250 MW pro Tag etwa 250000 Kubikmeter Frischwasser liefern soll. In der Bundesrepublik Deutschland, wo konventionell geheizte Entsalzungsanlagen seit langem zum Lieferprogramm einschlägiger Unternehmen gehören, beschränkt man sich noch darauf, durch detaillierte Rechenprogramme für die verschiedenen Reaktortypen und Entsalzungstechniken optimale Kombinationen zu finden. Nach einer Modellberechnung dieser Art würde ein Druckwasser-Reaktor-Kernkraftwerk von 200 MW elektrischer Leistung und mit einer Entsalzungskapazität von 400000 Kubikmeter pro Tag das Wasser für 45 Pfennig je Kubikmeter und den Strom für 2,6 Pfennig je Kilowattstunde liefern können. Der hier vorgesehene Reaktor würde ohne Entsalzung für den Betrieb eines 400-MW-Kraftwerks ausreichen. Als Destilliertechnik ist die mehrstufige Entspannungsdestillation (multi-stage flash destillation) vorgesehen, die heute als besonders aussichtsreich gilt.

Zusammenfassend läßt sich über die Meerwasser-Entsalzung in Kernenergieanlagen folgendes sagen: Da bei den derzeitigen Entsalzungstechniken etwa 50 Prozent der Kosten auf den Energieaufwand entfallen, ist die Verwendung billiger Kernenergie hier durchaus interessant. Allerdings gilt das nur für Doppelzweckanlagen, bei denen etwa je die Hälfte der Reaktorleistung auf die Stromerzeugung und Entsalzung entfallen und die Entsalzung praktisch mit Hilfe der Abwärme erfolgen kann. Für die Entsalzung benötigt man nämlich nur ein Temperaturniveau von 110 Grad Celsius, das allenfalls bis 140 Grad Celsius gesteigert werden kann. Selbst das verhältnismäßig niedrige Temperaturniveau der Wasserreaktoren von etwa 270 Grad Celsius läßt sich also bei reinen Entsalzungsanlagen nur zum Teil nutzen. Reine Kernenergie-Entsalzungsanlagen sind ökonomisch uninteressant, weil sie das vom Reaktor hergegebene Potential nicht ausschöpfen. Aus dem gleichen Grunde sind Hochtemperatur-Reaktoren und Brüter-Kernkraftwerke, deren ökonomischer Vorteil zum Teil in ihrer hohen Arbeitstemperatur liegt,

selbst in Doppelzweckanlagen gegenüber Wasserreaktoren nicht besonders vorteilhaft.
So stellt sich also bei der nuklearen Meerwasserentsalzung das entscheidende Problem, was mit dem zwangsweise anfallenden elektrischen Strom geschehen kann. In den Ländern, die das entsalzte Wasser so dringend brauchen, ist meist die Kapazität der elektrischen Netze nur gering, und diese können kaum große Kraftwerksblöcke von mehreren 100 MW verkraften. Damit die Kernenergie so billig wird, daß man mit ihr Wasser preisgünstig entsalzen kann, braucht man ja auch hier die großen Leistungseinheiten. Eine Möglichkeit, den überschüssigen Strom sinnvoll zu nutzen, könnte darin bestehen, neben der Destilliertechnik das Prinzip der umgekehrten Osmose und das Prinzip der Elektrodialyse zur Entsalzung zu verwenden. Diese Membranverfahren sind preisgünstiger als alle thermischen Verfahren, solange der Salzgehalt des zu reinigenden Wassers nicht zu hoch liegt, solange man es also mit Brackwasser zu tun hat. Die Grundwasserdepots der afrikanisch-asiatischen Trockengebiete weisen oft einen verhältnismäßig hohen Salzgehalt auf. Ist solches Brackwasser in nicht zu großer Entfernung verfügbar, könnte es also von der Doppelzweck-Destillieranlage unter relativ günstigen ökonomischen Bedingungen mit verarbeitet werden.
Weiter führen die in den letzten Jahren entwickelten Überlegungen, kombinierte Entsalzungs-Kernenergieanlagen zum Herzstück großer agro-industrieller Zentren inmitten der Wüste zu machen. Zur Verarbeitung der überschüssigen Elektrizität sollen in der Nachbarschaft der Kernenergieanlagen nicht nur große Farmen, sondern auch Chemiebetriebe angesiedelt werden, die einen hohen Energiebedarf haben, zum Beispiel Kunstdüngerfabriken oder Aluminiumhütten. Damit würden natürlich auch große Wohnsiedlungen erforderlich, die zur Klimatisierung einen erheblichen Strombedarf entwickeln. Solche agro-industriellen Zentren könnten sich zu großen Gemeinwesen entwickeln, die vom Ufer des Mittelmeers oder des Indischen Ozeans aus in die Wüste hineinwachsen und in sich weitgehend wirtschaftlich autark sind. Was sie benötigen, sind lediglich Rohrleitungen oder Wasserkanäle, die die Verbindung zum offenen Meer herstellen. Sonst wären sie Inseln der Zivilisation inmitten der Wüste, in deren Zentrum als eine Art Lebensborn jeweils eine große Kernenergieanlage stünde, die bei einer elektrischen Leistung von 2000 MW rund 4 Millionen Kubikmeter Frischwasser pro Tag erzeugen würde. Die Wüsteninseln würden in Gang gehalten durch je etwa 200 Tonnen Kernbrennstoff, von dem pro Jahr etwa ein Drittel ausgetauscht werden müßte.

Kernkraft für die Eisenerz-Verhüttung

Kaum weniger visionär – wenn auch nicht so sehr auf die Belange der Entwicklungsländer fixiert – sind die vor allem in der Kernforschungsanlage Jülich verfolgten Überlegungen zur Nutzung von Kernwärme für die Erzeugung von Stahl und Kunststoffen. Es geht dabei um eine weiterführende Entwicklung des Hochtemperatur-Reaktors. Erdöl oder Kohle sollen künftig nur noch das chemische Rohmaterial zur Synthese von Kunststoffen oder zur Reduktion von Eisen sein. Erdöl und Kohle sollen nicht zusätzlich auch noch die Energie liefern, mit der diese Prozesse in Gang gehalten werden. Diese Energie kann ein leistungsfähiger Hochtemperatur-Reaktor wesentlich billiger liefern, nämlich für etwa 3 bis 4 DM je Gigakalorie, gegenüber etwa 10 DM bei herkömmlichen fossilen Brennstoffen. Außerdem wird durch Benutzung der Kernwärme die Abgas-Produktion der Reduktions- und Syntheseprozesse erheblich reduziert.
Beim klassischen Hochofenprozeß verbrennt der dem Erz beigemischte Koks nur unvollständig, nämlich zu Kohlenmonoxidgas. Dieses Monoxidgas entzieht dann dem Eisenoxid des Eisenerzes den Sauerstoffanteil. Als Produkt dieser Reduktion bleibt dann das reine Eisen übrig. Dieser traditionelle Hochofenprozeß wird schon heute durch die Zugabe von Heizöl abgewandelt. Von den Kohlenwasserstoff-Verbindungen des Öls spaltet sich Wasserstoff ab, der sehr begierig auf Sauerstoff ist und gleichfalls das Eisenoxid reduziert. In Fortsetzung des so eingeschlagenen Wegs hat man in den letzten Jahren verschiedene Verfahren der Eisenerz-Direktreduktion entwickelt, bei denen auf den Kokseinsatz ganz verzichtet wird und Wasserstoff- oder Kohlenmonoxidgas das Erz zu Eisenschwamm reduziert. Der Eisenschwamm wird dann in einem Elektroofen zu Eisen oder Stahl umgeschmolzen. Man löst also den klassischen Hochofenprozeß auf in drei getrennte Teilprozesse: die Erzeugung des Reduktionsgases – auch Spaltgas genannt – in einem speziellen Röhrenofen, die Reduktion des Erzes mit Hilfe des Gases in einem sogenannten Reduktionsreaktor, dem ehemaligen Hochofen, und schließlich das Erschmelzen des Eisens oder Stahls aus Eisenschwamm und Schrott im Elektroofen. Bisher hat sich diese Verhüttungstechnik in Mitteleuropa noch nicht durchsetzen können, weil die Erzeugung der Reduktionsgase noch zu teuer ist. Durch die Verwendung von Hochtemperatur-Reaktorwärme besteht jedoch die Möglichkeit, die Erzeugung der Reduktionsgase so preisgünstig zu gestalten, daß die Direktreduktion wirtschaftlich interessant wird. Zugleich ist der anschließende Elektroofen ein guter Abnehmer für die elektrische Leistung des Kernreaktors, wenn auch nur zu einem gewissen Teil. Das Schlüsselproblem des ganzen Verfahrens ist die Entwicklung eines Röhrenofens, in dem Braun- und Steinkohle unter Beigabe von Wasserdampf vergast werden können. Das Produkt dieses Verfahrens ist das Spaltgas, eine Mischung von Wasserstoff und Kohlenmonoxid.



Prinzip der Eisenverhüttung durch nuklear gewonnenes Spaltgas in Verbindung mit einem Hochtemperatur-Reaktor. Das überwiegend aus Wasserstoff bestehende heiße Reduktionsgas – nach seiner Entstehung aus Wasser und aufgespaltenen Kohlenwasserstoffverbindungen auch als Spaltgas oder Wassergas bezeichnet – ersetzt den beim klassischen Hochofenprozeß verwendeten Koks.

1 Hochtemperatur-Kernreaktor 2 Dampfturbine mit Anzapfung für Prozeßdampf 3 Generator 4 Wärmetauscher zwischen Helium- und Dampfkreislauf 5 Röhrenspaltofen 6 Eisenreduktionsofen 7 Wärmetauscher zwischen Helium und Wassergas 8 Prozeßdampf 9 Eisenerz 10 Eisenschwamm 11 Wasserabscheider 12 Abgase mit unverbrauchtem Reduktionsgas 13 Wassergas, vor allem H_2

Dabei umströmt das aus dem Hochtemperatur-Reaktor kommende heiße Heliumgas die Rohre des Spaltgasofens und sorgt so für die zum Ablauf des Prozesses nötige Wärme.

Beherrscht man erst einmal die nukleare Spaltgaserzeugung, dann bieten sich über die Direktreduktion von Eisenerz hinaus noch weitere, zukunftsträchtige che-

mische Verfahren an. So kann man mit Hilfe geeigneter Katalysatoren Wasserstoffgas und Kohlenmonoxidgas zu Methanol synthetisieren. Methanol ist ein besonders umweltfreundlicher Treibstoff und könnte als Benzinzusatz helfen, die durch das Auto heraufbeschworenen Abgasprobleme entscheidend zu mildern. Es macht Bleizusätze entbehrlich und reduziert den Schwefelanteil. Eine andere Möglichkeit wäre die Äthylen-Synthese. Äthylen ist ein wichtiger Grundstoff für die Kunststoffherstellung, und es ist abzusehen, daß die Kunststoffproduktion eines Tages die Eisenproduktion an Menge und Bedeutung überflügeln wird.
In der Kernforschungsanlage Jülich ist ein Entwicklungsprogramm angelaufen, das vor allem die Erforschung des Wärmeübergangs vom nuklearen System des Hochtemperatur-Reaktors auf die Vergasungsprozesse zum Ziel hat. In Zusammenarbeit mit der Industrie wird eine große Versuchsanlage erstellt, mit der sich klären läßt, wieweit die bisher bekannten Technologien zur Umwandlung von Erdgas in Wasserstoff und zur Vergasung von Braunkohle auch mit nuklearer Wärme arbeiten können. Dieses Forschungs- und Entwicklungsprogramm soll bis etwa 1975 zum Bau einer ersten praktisch verwendbaren, nuklear heizbaren Röhrenofen-Anlage führen.

Strahlen steigern die landwirtschaftliche Produktion

Aber nicht nur mit nuklearer Wärme kann man chemische Reaktionen bewirken. Auch die Neutronenstrahlung eines Reaktors oder die Gammastrahlung von Isotopen, die im Reaktor zur Radioaktivität angeregt wurden, können katalytische Wirkung haben. Zum Beispiel fördern energiereiche Strahlungsteilchen in Polymerisaten – also Kunststoffen – die Bildung von Bindungsbrücken zwischen deren Riesenmolekülen. Die Folge ist eine erhebliche Steigerung der Festigkeit und der Temperaturbeständigkeit. Auf diese Weise lassen sich auch Holz- und Kunststoff-Moleküle miteinander verketten, und es entsteht so ein veredeltes Holz hoher Festigkeit. Die schon vor Jahren, gerade auch in der Bundesrepublik Deutschland verfolgten Pläne zum Bau spezieller Chemie-Reaktoren haben jedoch bisher noch keine feste Gestalt angenommen.
Wesentlich weiter ist man dagegen bei der Bestrahlung von Lebensmitteln zur Konservierung. Man kann das Auskeimen von Kartoffeln und Zwiebeln durch Bestrahlung verhindern oder zumindest stark verzögern. Die Lagerzeit von frischen Tomaten und Erdbeeren läßt sich so verdoppeln, und die Larven und Insekten, die erheblich an der Vernichtung unserer Getreidevorräte beteiligt sind, kann man auf diese Weise wirkungsvoll bekämpfen. Dieser neuartigen – kalten – Lebensmittelkonservierung sind jedoch Grenzen gesetzt durch die im Prinzip unvermeidlichen chemischen und physikalischen Veränderungen, die die Bestrah-

lung in den Lebensmitteln selbst auslöst. Es kann zu Veränderungen der Farbe, des Geschmacks und des Geruchs kommen, und möglicherweise werden die Eiweißstoffe verändert, so daß die Verdaulichkeit der Lebensmittel nachläßt. Es können sogar giftige Substanzen entstehen, und man muß die Möglichkeit ins Auge fassen, daß krebsbildende oder mutagene, also Änderungen der Erbeigenschaften auslösende Stoffe durch die Bestrahlung erzeugt werden.
Um diese Entwicklung aktiv weiterzuverfolgen, ist im Frühjahr 1971 in Karlsruhe, im Institut für Strahlentechnologie der Lebensmittel, ein internationales Forschungsprojekt angelaufen. Sein Ziel ist die Entwicklung von Bestrahlungsverfahren, durch die die Unschädlichkeit und Zuträglichkeit der bestrahlten Lebensmittel nicht in Frage gestellt wird. Angesichts der Tatsache, daß heute von der Weltnahrungsmittelproduktion durch Verderb und Insektenfraß ein großer Teil – man spricht von einem Drittel – verlorengeht, haben solche Forschungs- und Entwicklungsprojekte große praktische Bedeutung.
In ähnliche Richtung zielen die in der Bundesrepublik Deutschland von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in München betreuten Arbeiten, durch künstlich ausgelöste Mutationen ertragreichere Getreidesorten zu züchten, zum Beispiel bei der Gerste. Dabei geht es einerseits darum, überhaupt die Möglichkeiten zur gezielten Erzeugung von Erbänderungen durch ionisierende Strahlen oder chemische Einwirkungen zu erforschen. Andererseits will man aber auch praktisch brauchbare neue Getreidearten haben, die neben reicheren Erträgen auch bessere Beständigkeit unter veränderten klimatischen Bedingungen versprechen.
Eine andere Möglichkeit zur Ertragssteigerung besteht darin, die betreffenden Pflanzen im frühen Wachstumsstadium direkt zu bestrahlen. So wurden im Institut für Strahlenbotanik in Hannover bei verschiedenen Erdbeersorten Mehrerträge von 16 bis 20 Prozent erzielt, nachdem man die Jungpflanzen einer Bestrahlung von etwa 400 rad ausgesetzt hatte. Das ist eine Dosis, bei der Säugetiere schwere Strahlenschäden erleiden und ohne Behandlung mit etwa fünfzigprozentiger Wahrscheinlichkeit sterben. Die Erdbeer-Mehrerträge wurden nicht durch die Bildung größerer Früchte, sondern durch eine verstärkte Anregung zur Entwicklung von Blüten und Früchten erzielt.
Eine sehr raffinierte Methode der Schädlingsbekämpfung, bei der Mittelmeerfruchtfliege praktisch erprobt, besteht darin, die betreffende Insektenart künstlich zu züchten und die ausschlüpfenden Tiere durch Strahlung zu sterilisieren. Wenn sie dann ausschwärmen, paaren sie sich mit den dort lebenden Tieren, doch wegen der Sterilisation kommt es nicht zu einer Fortpflanzung, und die Art wird entsprechend dezimiert. Auch an Projekten dieser Art arbeitet man in der Bundesrepublik Deutschland.
Eine ganz andere Anwendung der Radioaktivität ist schließlich die Markierung



Durch eine mit Hilfe von Kernstrahlung ausgelöste Mutation konnte in einem Kölner Institut eine wesentliche Vergrößerung von Gerstenkörnern erreicht werden. Links im Bild die Ausgangssorte Haisa II, rechts die größeren Körner nach dem Auftreten der Mutation.
Die Mittelmeer-Fruchtfliege, die in südlichen Ländern bis zu 60 Prozent der Obsternte befällt und in ihrem Wert stark mindert, ist schon auf dem Vormarsch

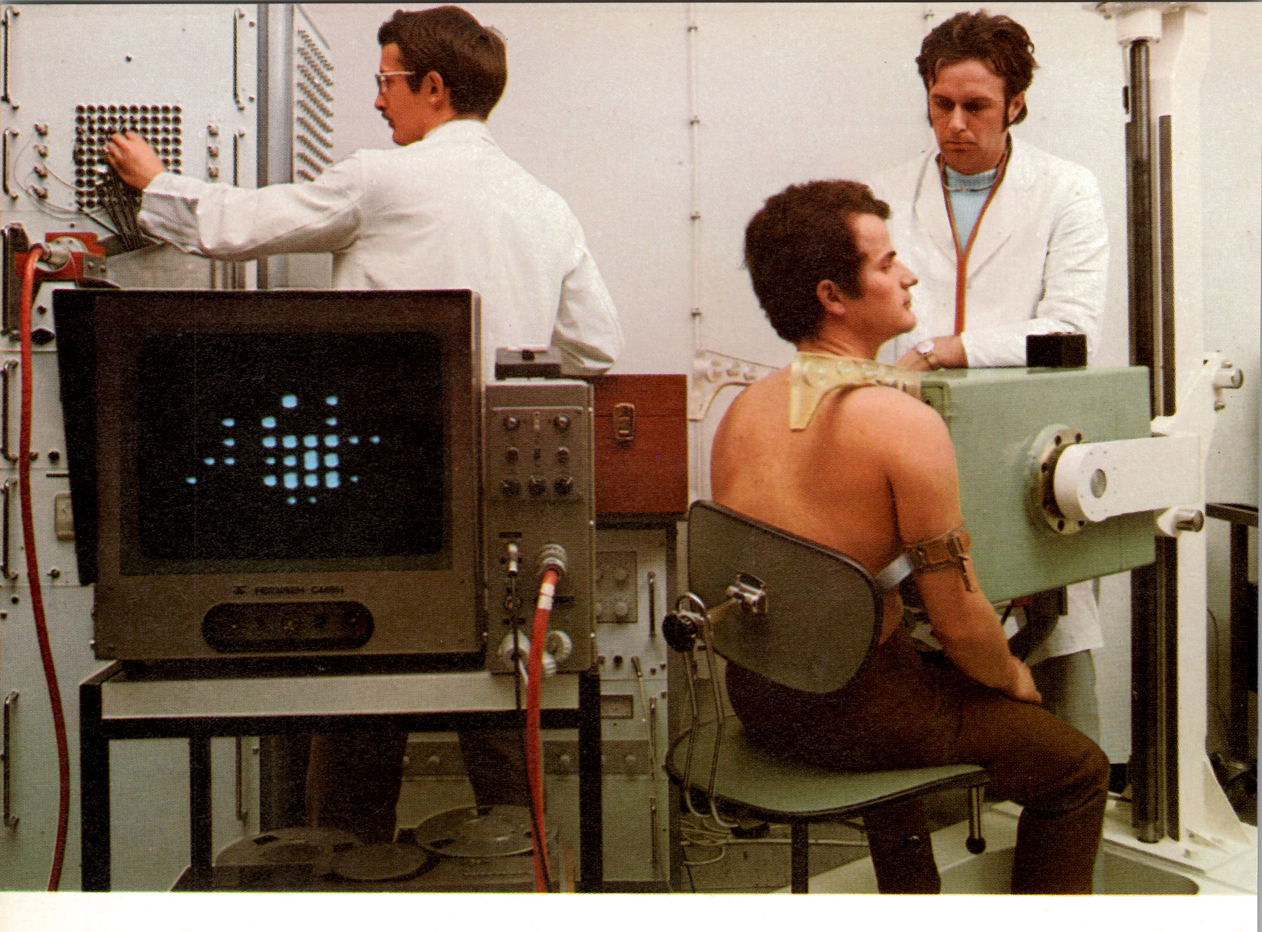
bestimmter Werkstoffe, Krankheitsherde oder Wasserströme mit der Hilfe radioaktiver Substanzen. Selbst in extrem starker Verdünnung lassen sich diese Stoffe einwandfrei nachweisen. Ihre Beigabe wirft also im allgemeinen keine Strahlenschutzprobleme auf. Wo es aber zum Beispiel darum geht, den Verlauf von Trinkwasserströmungen zu verfolgen, wird man nicht radioaktive Isotope, sondern stabile Isotope zur Markierung benutzen. Isotope sind ja zunächst einmal nichts anderes als Atomarten des gleichen chemischen Elements und darum mit gleichen chemischen Eigenschaften, jedoch mit etwas unterschiedlichem Atomgewicht. Fast alle in der Natur vorkommenden chemischen Elemente bestehen jeweils aus mehreren Isotopen-Anteilen. Erhöht man den einen Anteil künstlich



nach Norden und verlangt nach neuen Bekämpfungsmethoden. So werden in der Bayerischen Landesanstalt für Pflanzenschutz künstlich gezüchtete Larven von Fruchtfliegen einer harten Gammastrahlung von 8000 bis 10000 rad ausgesetzt, so daß die ausgeschlüpften Fliegen später nicht mehr zeugungsfähig sind. Wenn sie sich mit fertilen Fliegen der Natur paaren, gibt es keine Nachkommen, und im Verlauf mehrerer Generationen ist eine weitgehende Ausrottung möglich.

durch Isotopentrennung, mischt man also etwa dem normalen Wasser »künstliches« Wasser bei, in dem ein stabiles Sauer- oder Wasserstoff-Isotop künstlich angereichert ist, dann ist auch der betreffende Wasseranteil erkennbar. Nur ist es im Vergleich zu einer Markierung durch radioaktive Isotope viel aufwendiger, den veränderten stabilen Isotopenanteil eindeutig nachzuweisen. Auf diesem Gebiet arbeitet in der Bundesrepublik Deutschland das gleichfalls zur Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung gehörende Institut für Radiohydrometrie in München.

Die großen Anwendungsmöglichkeiten der Isotopentechnik liegen vor allem in der Medizin und in der Technik, doch darüber allein kann man ein ganzes Buch



Die im Institut für Medizin der Kernforschungsanlage Jülich entwickelte Gamma-Retina erlaubt es, den Weg einer radioaktiven Flüssigkeit im Blutkreislauf, speziell im Herzen, zu verfolgen. Die Gamma-Retina ist eine wabenförmige Anordnung von vielen kleinen, für Gammastrahlung empfindlichen Zählkristallen, entspricht also in ihrer Struktur den lichtempfindlichen Elementen der Retina unseres Auges. Je nach der Zählrate der Kristalle erscheinen auf einem Fernsehbildschirm in der gleichen räumlichen Anordnung hellere oder dunklere Punkte, die in ihrer Gesamtheit ein Bild des durchlaufenden Präparats ergeben. Der Patient sitzt vor der Gamma-Retina (im Bild rechts), nachdem ihm das radioaktive Präparat injiziert wurde.

schreiben. Wenn zum Beispiel ein Gehirntumor bevorzugt bestimmte chemische Elemente festhält, kann man ihn dadurch nachweisen, daß man dem Patienten ein Element dieser Art in radioaktiver Form verabreicht. Es kommt dann in der tumorverdächtigen Gegend zur Bildung eines Radioaktivitätszentrums, das sich von außen leicht durch systematisches Abtasten mit einem Szintillationszähler ausfindig machen läßt. Weiterhin hilft die Bestrahlung von krebsverdächtigem Gewebe in vielen Fällen, die Gefahr einer Krebsentstehung zu bannen, wenn die Bestrahlung nur früh genug erfolgt. Auch kann man mit Strahlen lebendes Gewebe sterilisieren und konservieren und in einer Art Gewebebank für spätere Transplantationen bereithalten. Sehr hohe Strahlungsdosen benutzt man, um medizinisches Gerät zu sterilisieren, insbesondere Kunststoffspritzen oder Kunststoffschläuche, die das sonst übliche Auskochen nicht gut vertragen.

Kernkraft für Unterwasser-Handelsschiffe

Es waren Schiffsreaktoren, die den Kernkraftwerken von heute den Weg bahnten. Doch diese Schiffsreaktoren waren und sind fast ausnahmslos in Kriegsschiffen eingesetzt, insbesondere in Unterseebooten, wo ein leistungsfähiger, von der Außenluft unabhängiger Antrieb natürlich besondere Vorteile bietet. Doch bei der Zivilschiffahrt steht der Durchbruch zur Wirtschaftlichkeit noch bevor und wird möglicherweise erst gegen Ende dieses Jahrzehnts erfolgen, wenn nicht, ähnlich wie bei den Landreaktoren, die Entwicklung eines Tages plötzlich viel schneller verlaufen wird.
Da die Bundesrepublik als führende Schiffbau-Nation nicht auf die Entwicklung des nuklearen Schiffsantriebs verzichten wollte, sah das deutsche Atomprogramm schon frühzeitig den Bau eines zivilen Kernenergie-Forschungsschiffs vor. Man entschied sich für einen Erzfrachter von nicht ganz 17000 BRT und 25000 Tonnen Wasserverdrängung, mit maximaler Antriebsleistung von 11000 Wellen-PS (WPS) und einer Auslegungsgeschwindigkeit von 15,7 Knoten, entsprechend 29 km/h. Als Antrieb wurde ein sogenannter fortschrittlicher Druckwasser-Reaktor gewählt, eine Leichtwasser-Reaktorkonstruktion, bei der das Core, die Dampferzeuger und die Umwälzpumpen für den primären Kühlkreislauf zusammen in einem Druckgefäß untergebracht sind. Die thermische Leistung dieses Reaktors ist auf 38 MW ausgelegt.
Im September 1963 erfolgte die Kiellegung dieses Schiffs, und bereits im Juni 1964 lief es vom Stapel. Es wurde auf den Namen »Otto Hahn« getauft. Im Oktober 1968 erfolgte die erste nukleare Probefahrt, und bereits einige Tage später wurde bei voller Reaktorleistung eine Geschwindigkeit von 17 Knoten erreicht, die Auslegungsgeschwindigkeit also um mehr als 8 Prozent übertroffen. Seither

absolviert das Kernenergie-Forschungsschiff NS »Otto Hahn« ein umfangreiches Forschungs- und Erprobungsprogramm, um die Grundlagen für den Bau eines großen Demonstrations-Kernenergie-Handelsschiffs vorzubereiten, für das das deutsche Atomprogramm ähnliche finanzielle Hilfen vorsieht, wie sie seinerzeit bei den Kernkraftwerken Lingen und Obrigheim von der öffentlichen Hand gewährt wurden.

Es hat sich bei den seitherigen Fahrten der »Otto Hahn« gezeigt, daß das hier gewählte nukleare Antriebssystem den besonderen Anforderungen des Seegangs und den wechselnden Leistungsanforderungen eines Schiffsantriebs voll gerecht wird, auch bei sehr rauher See und extremen klimatischen Bedingungen. Aber auch das Schiff als solches zeigte bei schlechtem wie bei ruhigem Wetter und auf allen Kursen ein sehr gutes Seeverhalten. In den ersten Erfahrungsberichten heißt es, die Erwartungen von Erbauer und Betreiber seien übertroffen worden. Echte Schwierigkeiten gab es bisher lediglich bei der Erlangung der Genehmigungen zum Anlauf ausländischer Häfen. Dazu sind mangels internationaler Regelungen noch aufwendige Regierungsabkommen notwendig.

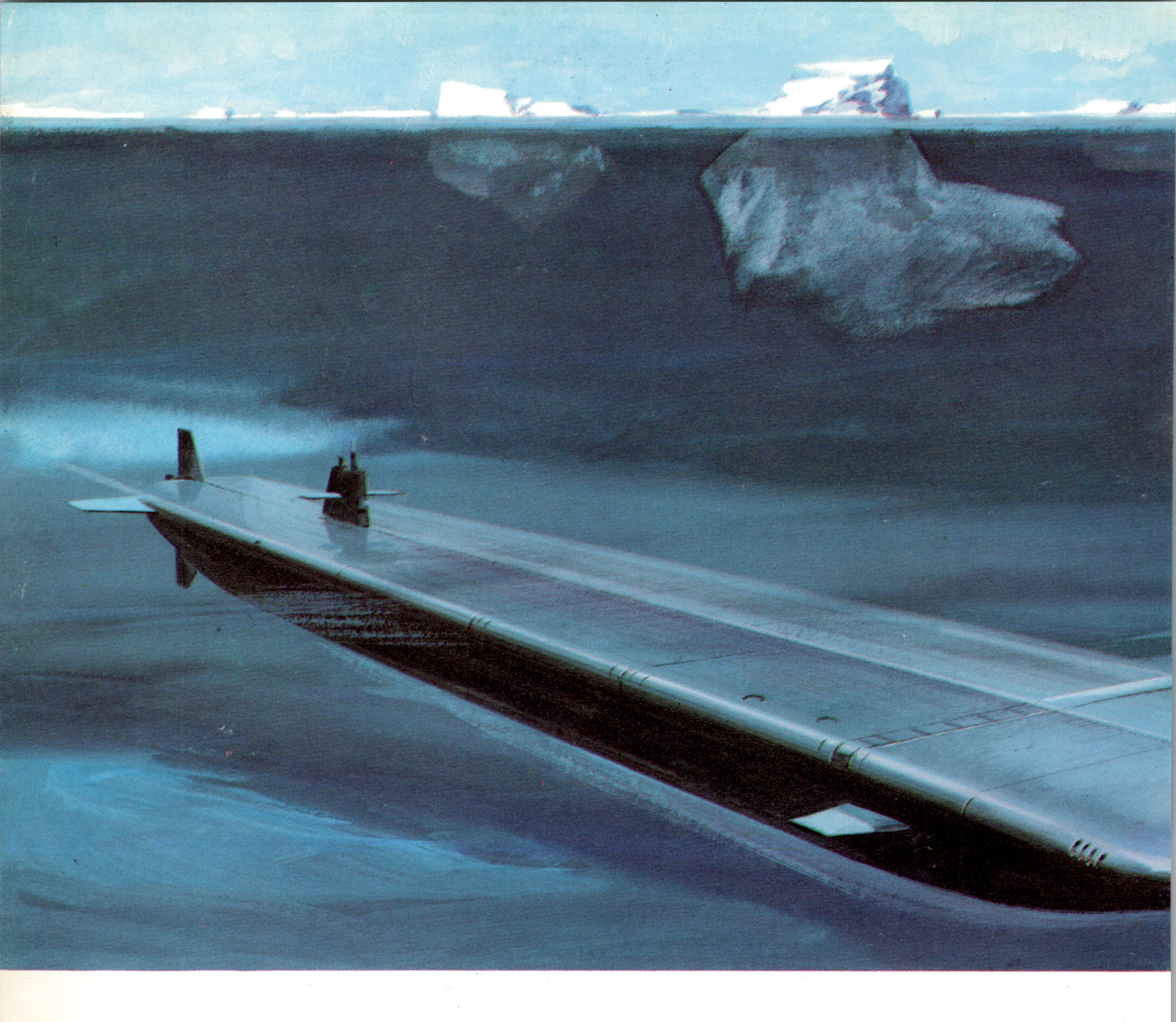
Trotz dieser günstigen Erfahrungen ist zur Zeit nicht abzusehen, wann das im deutschen Atomprogramm vorgesehene große Demonstrations-Kernenergie-Handelsschiff in Auftrag gehen wird. Die gesamte Schiffsentwicklung ist seit einigen Jahren in erheblicher Bewegung, und die darin erkennbare Tendenz zu sehr großen und schnelleren Schiffen kommt dem nuklearen Schiffsantrieb sehr entgegen. Wie bei den Landreaktoren arbeiten natürlich auch Schiffsreaktoren um so preisgünstiger, je größer sie sind. Andererseits wird man zunächst aus Sicherheitsgründen zwei parallel arbeitenden Reaktoranlagen den Vorzug geben. Bei der »Otto Hahn« ist für den Notfall ein konventionell beheizter Hilfsantrieb von etwa 2000 WPS eingebaut.

Der allgemeine Durchbruch des kommerziellen Kernenergie-Schiffsantriebs zur Wirtschaftlichkeit wird aber spätestens dann erfolgen, wenn die Tankerflotten auf Unterwasserbetrieb umgestellt werden. Der Anlaß dazu kann die Erschließung der großen Ölvorkommen in Alaska sein. Für den Transport des Alaska-Öls zu eisfreien Häfen in Grönland, Island oder Kanada hat ein amerikanisches Unternehmen kürzlich atomgetriebene Unterwassertanker von 170000 Tonnen Wasserverdrängung angeboten. Die Schiffe können das arktische Eis untertauchen und ihre Ladung später in Überwassertanker umpumpen. Bei einer Länge von 270 Metern, einer Breite von 42 Metern und einer Tiefe von 25 Metern sollen die U-Tanker eine Reisegeschwindigkeit von 18 Knoten entwickeln. Eine Marktanalyse hat ergeben, daß etwa 18 Tanker dieser Art bis 1980 für den Abtransport des Alaska-Öls gebraucht werden. – Wegen der ungeklärten Transportmöglichkeiten war das gesamte Alaska-Ölprojekt schon etwas ins Stocken geraten. Dementsprechend ist das Interesse der Ölfirmen an den Atom-U-Tankern groß.



Die »Otto Hahn«, das deutsche Reaktorschiff und zur Zeit einzige zivile Atom-Frachtschiff der Welt überhaupt.

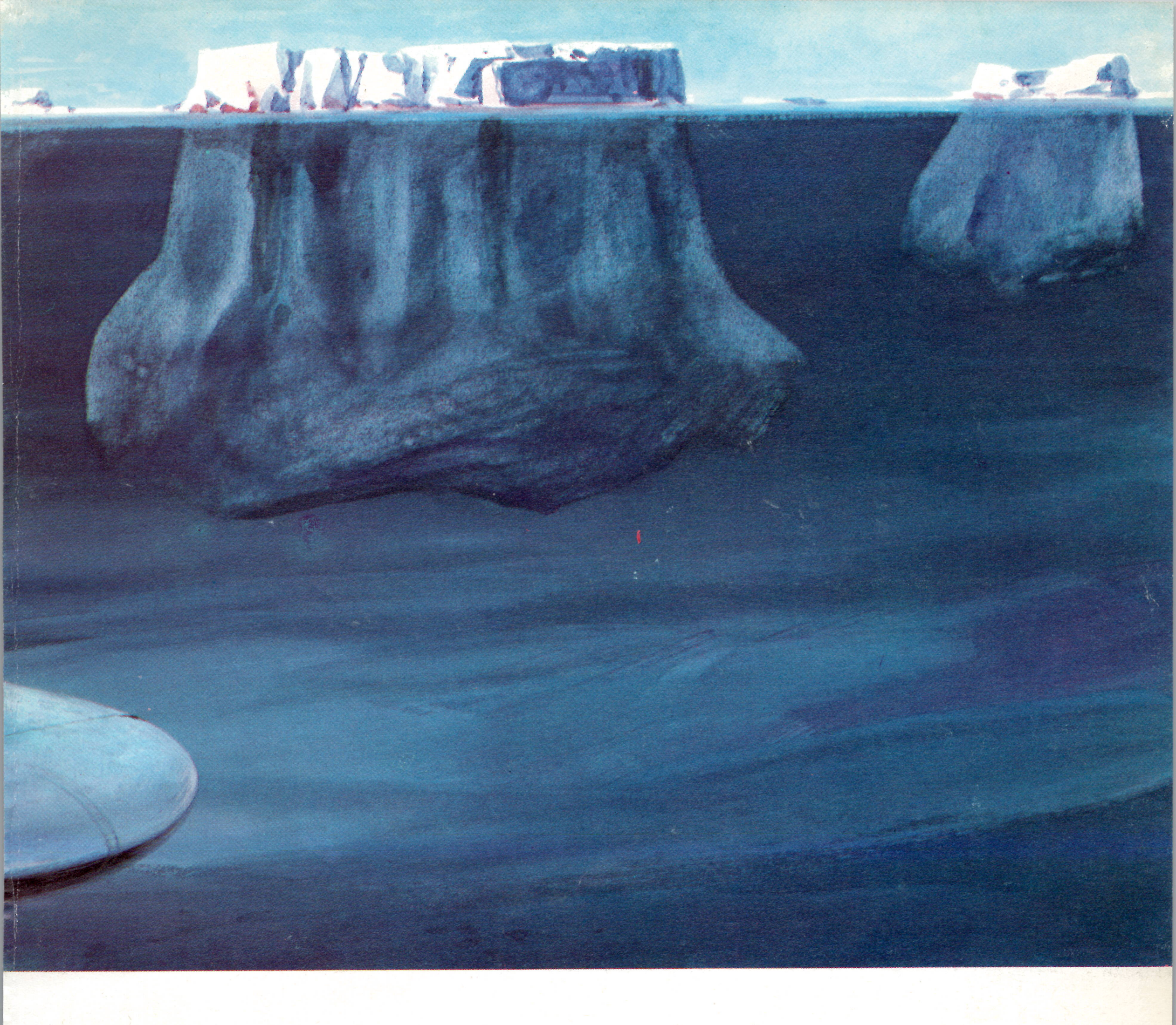
Das ist aber nur der erste Schritt zu einer künftigen allgemeinen U-Handelsflotte. Bei einer Fortbewegung unter Wasser entgeht man den Unbilden des Wetters, und außerdem verringert sich der Widerstand, den ein Schiff bei seiner Fortbewegung zu überwinden hat. Der dadurch erzielbare wirtschaftliche Gewinn darf jedoch nicht aufgezehrt werden durch die zusätzlichen Navigationshilfen. In jedem Fall verlangen aber U-Handelsschiffe nuklearen Antrieb.
Für andere Verkehrsmittel hat der nukleare Antrieb kaum Chancen, schon aus Sicherheitsgründen. Man kann nicht den Absturz eines Flugzeugs mit einem Reaktor an Bord – und schon gar nicht ein Eisenbahnunglück eines kleinen Kernkraftwerks – riskieren. Erst im Weltraum, außerhalb der irdischen Lufthülle,



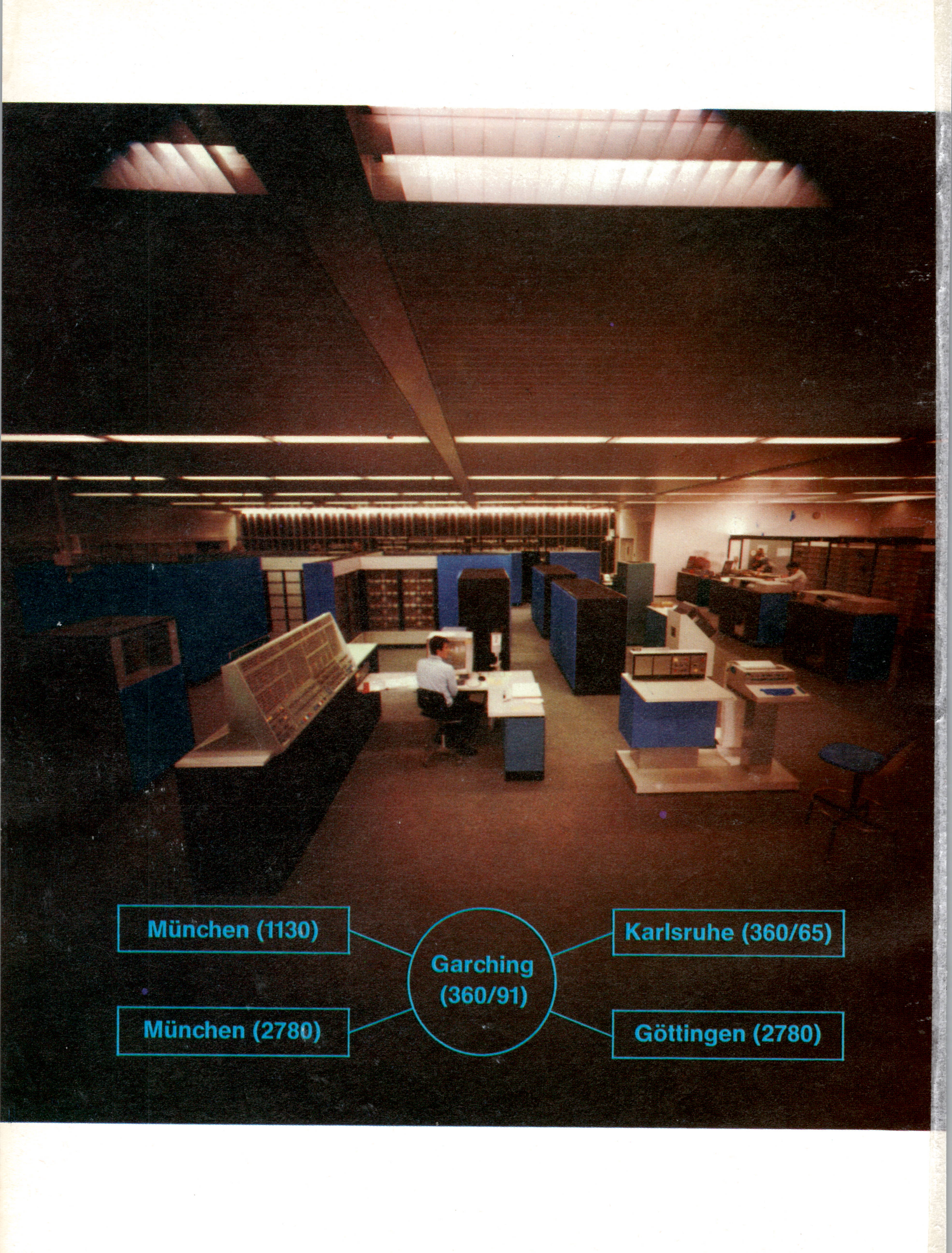
Die heutigen Super-Tanker werden bald durch kernkraftgetriebene U-Tanker ergänzt werden, um die neuen gewaltigen Ölfunde in Alaska ausbeuten zu können.

kann ein Kernenergieantrieb wieder interessant werden. So wird in den USA nach wie vor die Entwicklung des Nerva-Reaktors weiterverfolgt, dessen Entwicklungsziel zur Zeit die Erzeugung einer Leistung von 4000 MW für die Dauer von 10 Stunden bei einem Schub von etwa 40 Tonnen ist. Die damit ausgerüstete Raketenstufe muß aber zunächst mit der Hilfe einer konventionellen Stufe gestartet und in den Raum hinausgebracht werden. Das gesamte Raketensystem soll etwa 1978 oder 1979 betriebsbereit sein.

In der Tat, es gibt auf der Erde wichtigere Aufgaben, die der Hilfe durch die Kernkraft harren. Wenn wir die durch sie gegebenen Möglichkeiten voll aus-



schöpfen wollen, müssen wir in Zukunft noch mehr als bisher gerade jene Kernkraftanwendungen weiterentwickeln, die den Entwicklungsländern helfen können. Die wiederholten Diskussionen im Kreis der Internationalen Atomenergie-Organisation haben erkennen lassen, daß die Verpflanzung hochentwickelter Technologien in Entwicklungsländer nicht immer ohne weiteres möglich ist und nicht aus Prestigegründen mit Gewalt erfolgen sollte. Doch sicher wäre es ein Mißbrauch der Kernkraft-Möglichkeiten, würden sie nur dazu benutzt, die reichen Länder noch reicher zu machen. Ein wenig schlechtes Gewissen kann da vorerst noch ganz heilsam sein.


München (1130)
Karlsruhe (360/65)
Garching
(360/91)
München (2780)
Göttingen (2780)

Alternativen für die Zukunft

Der weltweite Energiehunger bleibt

Je mehr der Mensch damit beschäftigt ist, sich die Erde untertan zu machen, desto häufiger passiert es, daß er sich den Göttern gleich fühlt. Es kommt nicht von ungefähr, wenn im Zusammenhang mit der Erschließung der Kernkraft davon gesprochen wird, wir hätten das Feuer der Sterne auf die Erde geholt. Doch machen wir uns nichts vor! Wir sind allenfalls »Prothesen-Götter«, wie es kürzlich einmal Hans Grümm formuliert hat. Unsere Macht über die Natur basiert auf den Energiequellen, die wir uns erschlossen haben. Die Natur, deren früherer Ungestörtheit wir heute nachtrauern, ist uns von Haus aus feindlich gesinnt. Sie wäre für uns nur die Quelle von Kälte, Hunger und Krankheit, stünden wir ihr plötzlich ohne unsere Energiequellen gegenüber. Licht, Wärme, Nahrung und Kleidung, unsere Fähigkeit, innerhalb weniger Stunden Kontinente zu durchqueren, und die Möglichkeit, in Sekundenbruchteilen über Tausende von Kilometern hinweg mit anderen Menschen in Informationsaustausch zu treten – die Prothesen unserer Macht – resultieren alle aus einer intensiven Nutzung von Energiequellen.
So trivial diese Zusammenhänge auch erscheinen, wir werden uns ihrer nur selten bewußt. Würden wir über sie mehr nachdenken, müßte uns das Schaudern packen darüber, wie schmal der Grat ist, auf dem wir mit unserer Zivilisation wandern.

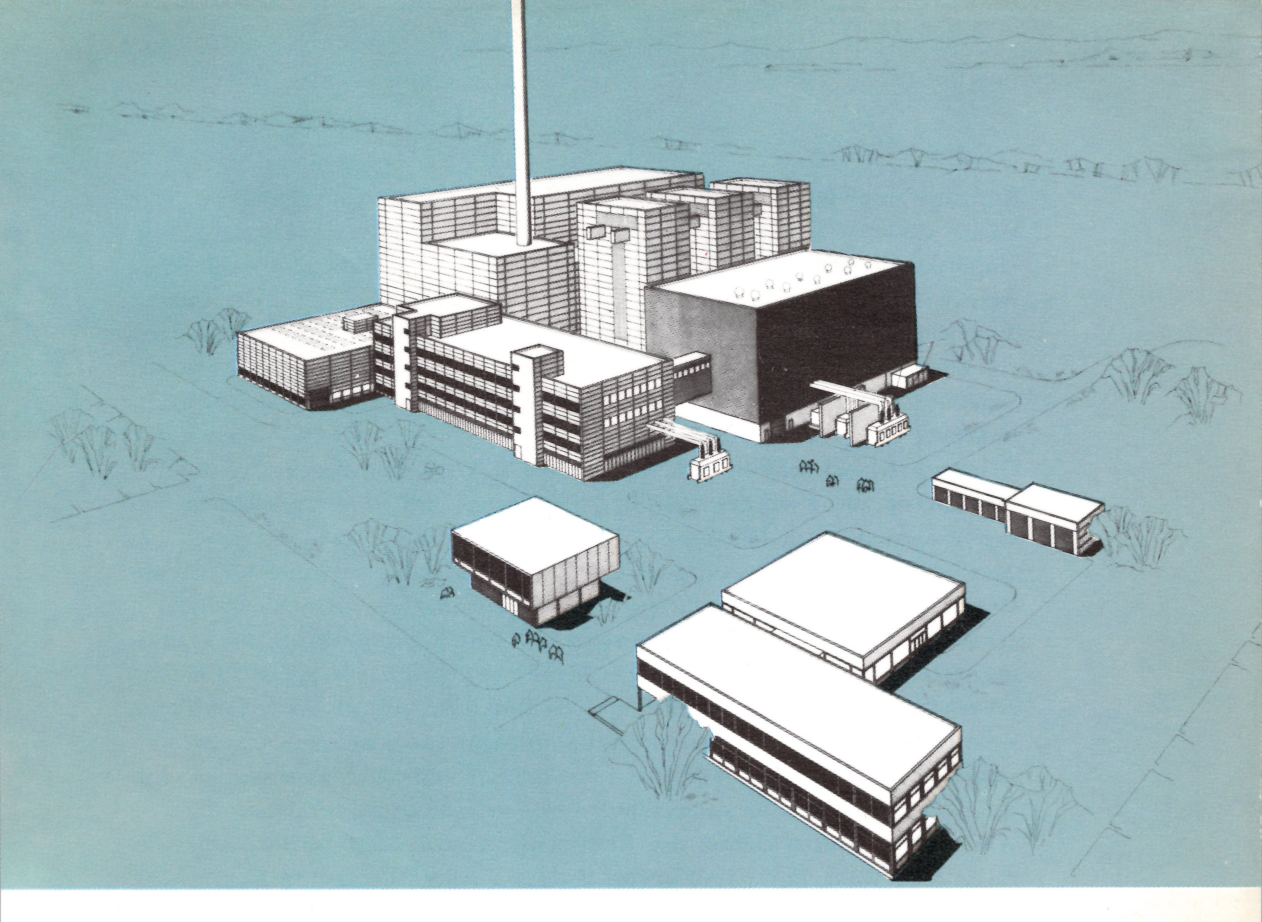
Die Erschließung der Kernenergie hat in besonderer Weise die Entwicklung und Anwendung großer Computer gefördert. In der Bundesrepublik Deutschland verfügt das Institut für Plasmaphysik in Garching über eine Großrechenanlage vom Typ IBM 360/91, bis vor kurzem die größte und schnellste Maschine auf dem Markt. Sie arbeitet mit einem nicht ganz so großen Computer des Karlsruher Kernforschungszentrums über eine spezielle Datenleitung direkt zusammen. Außerdem haben noch andere wissenschaftliche Institute in Göttingen und im Münchener Raum direkten Zugriff zu der Garchinger Maschine.

Eine Berechnung der Vereinten Nationen zeigt, daß der Welt-Energieverbrauch im Jahr 2000 etwa viermal so hoch sein wird wie 1970. Während der letzten drei Jahrzehnte unseres Jahrhunderts wird die Menschheit mehr Energie verarbeiten, als sie während ihrer gesamten Existenz bis 1970 verbraucht hat. Erst seit etwa hundert Jahren beuten wir die Kohlelagerstätten der Erde aus, und seit gut zehn Jahren nutzen wir ihre Erdöl- und Erdgasvorräte intensiv. Doch angesichts des so steil ansteigenden Welt-Energieverbrauches droht bereits das Gespenst einer Verknappung dieser fossilen Energieträger. Was die Natur im Verlauf von einigen hundert Millionen Jahren in dieser Form angesammelt hat, verheizen wir in majestätischer Unbekümmertheit innerhalb weniger Jahrhunderte.

Mehr als ferne Menschheitsbeglückung

Spätestens gegen Ende des nächsten Jahrhunderts müßte die Menschheit ihren Energieverbrauch entscheidend drosseln, stünde ihr als Alternative nicht die Kernkraft zur Verfügung. Der nachfolgende Energieversorgungsrückgang würde uns etwa bis zum Jahr 2400 zu den »paradiesischen« Energieverbrauchszuständen des Jahres 1800 zurückführen. Schon vor einigen Jahren wurde bei einer Tagung des Deutschen Atomforums festgestellt, schneller als erwartet sei sichtbar geworden, daß es sich bei der Nutzung der Kernenergie nicht um ein fernes Ziel der Menschheitsbeglückung, sondern um eine Notwendigkeit handle, die einmal eine ähnliche Rolle spielen werde wie die Erfindung der Dampfmaschine.

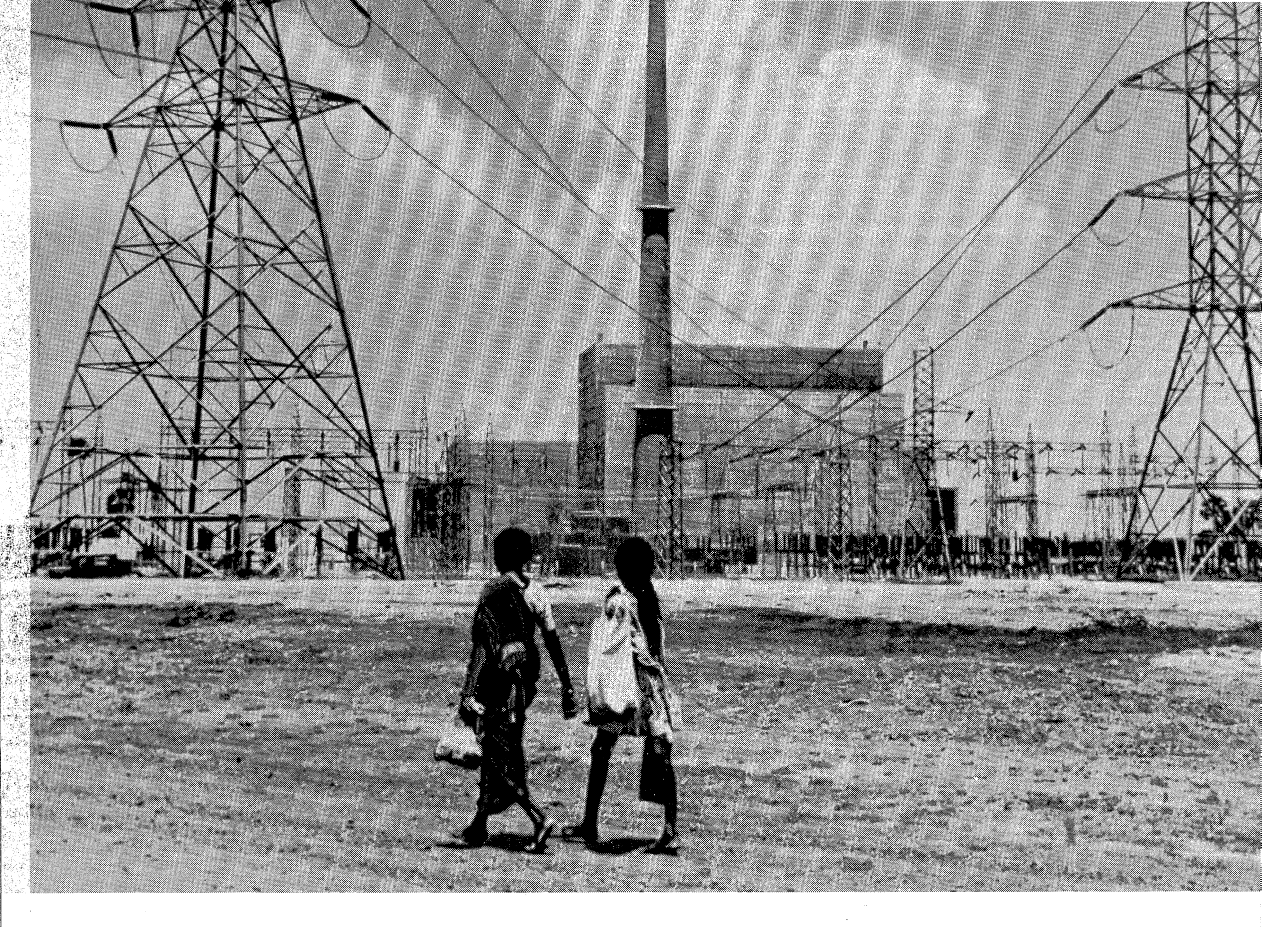
Doch selbst wenn Kohle und Erdöl noch auf Jahrhunderte hinaus unbegrenzt zur Verfügung stünden und von dorther kein Grund bestünde, die »Dampfmaschine« durch Kernenergieanlagen zu ergänzen, es droht noch eine andere Gefahr. Wir könnten schon recht bald zu der Einsicht kommen, daß die durch Verbrennungsprozesse ausgelösten Umweltveränderungen nicht weiter zu verantworten sind und darum eingeschränkt werden sollten. Ein großes, mit Kohle arbeitendes Kraftwerk von 350 MW elektrischer Leistung bläst pro Tag nicht weniger als 75 Tonnen Schwefeldioxid, 16 Tonnen Stickoxide und 5 Tonnen Aschestaub in die Luft, produziert etwa 10000 Tonnen Kohlensäuregas und verbraucht 8000 Tonnen Sauerstoff. Schon machen sich die Schwefeloxide durch mutagene und gesundheitsschädliche Wirkungen auf Lebewesen bemerkbar, und vor allem ist die Erhöhung der Kohlensäurekonzentration in der Atmosphäre nicht auf die leichte Schulter zu nehmen. Gegenwärtig steigt der Kohlensäurepegel in der Atmosphäre rasch an, nämlich pro Dekade um etwa 7 ppm (parts per million). Er betrug ursprünglich einmal etwa 295 ppm und hat bereits 320 ppm erreicht. Bis zum Jahr 2000 wird der Kohlensäuregehalt der Atmosphäre auf 380 bis 400 ppm angestiegen sein.



Mit dem Bau des Brüter-Prototyp-Kraftwerks SNR-300 am Niederrhein (unser Bild) wird der entscheidende Schritt zu einer neuen Generation von Kernkraftwerken getan. Mit ihr hört die heute noch übliche Uranverschwendung auf.

Als Folge davon ist eine Verringerung der Abstrahlung von Erdwärme in den Weltraum, also eine Erhöhung der Durchschnittstemperaturen auf der Erdoberfläche zu befürchten. Andererseits dürfte die zunehmende Verstaubung der Atmosphäre zu einer Verringerung ihrer Transparenz und damit einer Verringerung der Temperaturen auf der Erde führen. Noch halten sich beide Effekte offenbar die Waage, aber wir wissen nicht, wie empfindlich das Gleichgewicht ist, an dem wir herumfingern. Vielleicht wird uns die Natur noch lange Zeit gewähren lassen, vielleicht stehen wir aber auch schon unmittelbar vor einem »Umkippen«. Jedenfalls bietet die Kernkraft auch von dieser Seite her eine hochwillkommene Alternative für die Zukunft.
Natürlich bekommen wir wie stets auch diesen Fortschritt nicht ganz umsonst. Die Nutzung der Kernkraft führt zum Aufbau eines Radioaktivitätspotentials, das im Prinzip absolut sicher gehandhabt werden kann, bei dem aber immer noch ein

Körnchen Angst bleibt, weil eben doch trotz aller Perfektion einmal irgendwo eine Panne passieren könnte. Auch bei der sonst so sicheren Eisenbahn gibt es Unglücke, die dann gern unter die Rubrik »menschliches Versagen« eingeordnet werden. Dennoch besteht da ein entscheidender Unterschied. Bei der Kernkraft, die gegen das Image der Atombombe antreten mußte, haben Fragen der Sicherheit von allem Anfang an im Vordergrund der Entwicklung gestanden. Hier wurde Sicherheit nicht – wie sonst üblich – erst nach entsprechenden Unglücksfällen eingebaut.
Dementsprechend sieht die Sicherheitsstatistik in kerntechnischen Anlagen bisher sehr günstig aus. Zwischen 1945 und 1970 haben sich bei Kernreaktoren und zugehörigen Anlagen bisher sieben Todesfälle von Betriebsangehörigen durch oder mit Strahlenunfällen ereignet. Es handelte sich dabei fast ausschließlich um Unfälle in militärischen Einrichtungen und in einem frühen Entwicklungsstadium der Kerntechnik. Aus der Bevölkerung ist bisher im Zusammenhang mit Reaktoren und Kernkraftwerken kein einziger Mensch zu Schaden gekommen, immerhin bei heute etwa 500 in Betrieb befindlichen Reaktoren auf der Welt. Die beiden Versicherungspools, bei denen sämtliche privaten amerikanischen Kernenergieanlagen haftpflichtversichert sind, wurden bisher von diesen kein einziges Mal in Anspruch genommen. Sie haben ihre Prämien bereits viermal herabgesetzt.
Was die Weiterentwicklung der Kernenergieanlagen selbst betrifft, bietet die Zukunft ein weites Feld physikalischer und technischer Alternativen. Die heute so erfolgreichen Leichtwasser-Kernkraftwerke wird man später vielleicht einmal mit Henry Fords berühmtem »Modell T« vergleichen, jenem unverwüstlichen, 1910 entwickelten und dann in 15 Millionen Exemplaren gebauten Auto, mit dem die Volksmotorisierung begann. Als technische Verbesserung des Siedewasser-Reaktors bietet sich noch die nukleare Überhitzung an, also eine zusätzliche Aufheizung des Dampfs im Core. Zur Erprobung dieses Prinzips ist im Rahmen des Deutschen Atomprogramms ein Heißdampf-Reaktor in Großwelzheim am Main in unmittelbarer Nachbarschaft des ersten deutschen Versuchskernkraftwerks in Kahl gebaut worden. Erst anhand der dort gewonnenen Betriebserfahrungen wird man einmal beurteilen können, ob die so erreichbare Wirkungsgradverbesserung die größere Kompliziertheit des Brennelements lohnt. Eine andere technische Weiterentwicklung der Leichtwasser-Reaktoren könnte darin bestehen, ihre seitherigen stählernen Druckgefäße durch Spannbetonkonstruktionen zu ersetzen.
Erst mit dem Durchbruch zu voll wirtschaftlich arbeitenden großen Brüter-Kernkraftwerken wird die nukleare Energieerzeugung praktisch unabhängig von Uranpreisen und Anreicherungsanlagen. Dabei wird am Anfang noch etwas die kompliziertere Kühltechnik mit ihren zwei Natriumkreisläufen und einem Dampfkreislauf stören. Doch man dürfte bald Wärmetauscherkonstruktionen finden, die einen der beiden Natriumkreisläufe entbehrlich machen. Parallel zur



In Indien begann das Zeitalter der intensiven Kernkraftnutzung 1969 mit der Inbetriebnahme der Tarapur-Station. Dieses Kernkraftwerk arbeitet mit zwei Druckwasser-Reaktoren von je 200 MW elektrischer Leistung und hatte bis zum Frühjahr 1971 bereits vier Milliarden Kilowattstunden Strom erzeugt.

Brüterentwicklung dürfte der Hochtemperatur-Reaktor der Kerntechnik wesentlich breitere Anwendungsmöglichkeiten erschließen, und am Ende wird man versuchen, die beiden Entwicklungsrichtungen miteinander zu verschmelzen. Man wird den gasgekühlten Hochtemperaturbrüter entwickeln, der mit einem einzigen, die Gasturbinen mit einbeziehenden Kühlkreislauf auskommt. Sein Core könnte lediglich aus beschichteten Brennstoffteilchen bestehen, die wie grober Sand aufgeschüttet sind und zwischen denen das aufzuheizende Gas entlangstreicht. Der Brüterbrennstoff, die Mischung aus Plutonium und Uran, sollte schließlich die chemische Form von Karbiden oder Nitriden haben und ein echter Hochleistungsbrennstoff sein.

Wir werden es erleben

Unterdessen wird das letzte Jahrzehnt unseres Jahrhunderts angebrochen sein, und noch bevor dieses Jahrhundert zu Ende geht, dürften die Fusions-Kernkraftwerke praktische Bedeutung erlangen, sofern die Physik das einmal zuläßt. Mit den Fusions-Kernkraftwerken vereinfacht sich wieder das System der Energieerzeugung. Es entfällt der Brennstoffkreislauf, es gibt keine radioaktiven Spaltprodukte mehr, und man hat es wieder mit einer Art von Verbrennung zu tun, eine Verbrennung allerdings, bei der auch keine giftigen Abgase mehr entstehen und bei der nicht ein kleiner kostbarer, von der Natur mühevoll aufgebauter Vorrat an ehemals organischer Substanz aufgezehrt wird. Damit könnte das ideale Endstadium der menschlichen Bemühungen um eine sichere, saubere und billige Energieversorgung erreicht sein. Die jüngeren unter uns haben durchaus die Chance, das noch zu erleben. Nicht einmal vierzig Jahre sind vergangen, seit Lord Rutherford – damals die überragende Persönlichkeit in der Atomforschung – 1933 in London auf einer Tagung der Physikalischen Gesellschaft kategorisch erklärte: »Leute, die eine Freisetzung der Atomenergie prophezeihen, bellen den Mond an.« – – –

Was uns aus dem Höhlendasein unserer Vorfahren herausgeführt hat, ist die Fähigkeit des Menschen, die Natur zu verändern, sie in seinem Sinn zu nutzen. Es sei dahingestellt, wieweit der Mensch von dieser Fähigkeit immer angemessen Gebrauch gemacht hat, wieweit er nicht den Versuchungen eines Mißbrauchs erlegen ist. In jedem Fall bildet diese Fähigkeit die Grundlage unserer Existenz. Mit der Erschließung der Kernkraft erleben wir jetzt einen entscheidenden Schritt zur Weiterentwicklung dieser Fähigkeit. Es besteht kein Anlaß, darüber nun besonders stolz zu sein und sich als Nachfahre von Zeus oder Prometheus zu fühlen. Doch die Konsequenz dieser Entwicklung, ihre Unausweichlichkeit, müssen wir sehen.

Sicher wird sich in den Industriestaaten eines Tages die Strombedarfskurve abflachen. Die Entwicklungsländer werden einmal ihren Nachholbedarf an technischer Entwicklung gedeckt haben, und die sich vorerst noch so explosionsartig ausweitende Weltbevölkerung wird einmal auf ein neues konstantes Niveau eingependelt sein. Dann ist die Zeit reif, daß auf dem hektischen Energiemarkt Ruhe eintritt. Doch mit Sicherheit wird auch dann der laufende Energiebedarf groß bleiben. Und nur die Kernkraft wird diesen Bedarf decken können. Da gibt es keine Alternative.

Anhang

Organisation und Kooperation

Grundlagen des deutschen Atomprogramms

Der in der Bundesrepublik für die Entwicklung von Kernforschung und Kerntechnik geschaffene Rahmen unterscheidet sich von den Organisationsformen anderer Länder zum Teil ganz erheblich. Von Anfang an ging es hier ausschließlich um die friedliche Nutzung der Kernenergie. Der Wirtschaftsstruktur der Bundesrepublik entsprechend wollte man so weit wie möglich auf staatlichen Dirigismus verzichten und der Beteiligung der Industrie breiten Raum einräumen. Wie in kaum einem zweiten Land war man bereit, an internationalen Projekten mitzuarbeiten.
Dabei bot der verspätete Einstieg der Bundesrepublik – sie erhielt erst 1955 ihre »Atomhoheit« zurück – die Möglichkeit, aus Fehlentwicklungen in anderen Ländern zu lernen, verhinderte jedoch nicht eigene Fehleinschätzungen anderer Art. Zu sehr orientierte sich die staatliche Förderung hier zunächst an Leitbildern der Grundlagenforschung. Erst später wurde man sich bewußt, daß die Erschließung der Kernkraft eine Aufgabe ist, die nur gemeinsam von Forschung, Staat und Wirtschaft bewältigt werden kann und neue Organisationsstrukturen verlangt. Im Vorwort des derzeitigen, noch bis Ende 1972 laufenden dritten deutschen Atomprogramms heißt es dazu: »Die Lösung der Aufgaben in Kernforschung und Kerntechnik führt häufig zu Großprojekten, die Beträge von mehreren 100 Millionen DM erfordern und deren Abwicklung sich auf viele Jahre erstreckt. Solche Großprojekte legen allen beteiligten Stellen ein besonderes Maß an Verantwortung auf. Sie bedürfen eines engen Zusammenwirkens zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Staat. Diese Partnerschaft ist ein besonderes Kennzeichen staatlicher Förderpolitik in der Bundesrepublik Deutschland.«

Atomkommission und Wissenschaftsministerium

Dieses partnerschaftliche Zusammenwirken findet seinen Ausdruck vor allem in der Beratung des Bundesministers für Bildung und Wissenschaft durch die Deutsche Atomkommission und die Projektkomitees. Die Atomkommission berät bei allen wesentlichen Angelegenheiten der Erforschung und Verwendung der Kernenergie für friedliche Zwecke. Sie umfaßt vier Fachkommissionen und zehn Arbeitskreise mit insgesamt 144 Beratern. Die Projektkomitees, von denen es zur Zeit fünf mit insgesamt 67 Beratern gibt, beobachten die Durchführung einzelner Vorhaben und geben Empfehlungen zu deren Koordination ab.
Die Rolle der Deutschen Atomkommission kann nicht mit der der Atomic Energy Commission (AEC) oder der staatlichen Atombehörden in Großbritannien, Frankreich und

Kanada verglichen werden. Sie ist eher das, was man im Englischen als »board« bezeichnet. Sie ist ein reines Beratungsgremium des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft, das nach der offiziellen Terminologie den Auftrag hat, »alle mit der Erforschung und Nutzung der Atomkernenergie für friedliche Zwecke zusammenhängenden Fragen federführend im Benehmen mit den anderen beteiligten Bundesministerien zu bearbeiten. Die Deutsche Atomkommission hat keinerlei Entscheidungs- und Machtbefugnisse. Sie ist auch nicht gegenüber dem Parlament verantwortlich. Doch das moralische Gewicht ihrer Empfehlungen ist groß, denn ihre Berater sind maßgebliche Fachleute. Als besonders fruchtbar hat sich die Zusammenarbeit mit der Deutschen Atomkommission erwiesen bei der Diskussion neuer Projekte. Gegenwärtig ist das Ministerium dabei, zur Steigerung seiner Effizienz und Transparenz sein Beratungswesen neu zu ordnen. Die Erfahrungen mit der Deutschen Atomkommission werden dabei beachtet.
Im gleichen Maße, wie das aus dem Atomministerium hervorgegangene Ministerium für wissenschaftliche Forschung – seit Oktober 1969 Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft – in den letzten Jahren dazu übergeht, Prioritäten zu setzen und echte Wissenschaftspolitik zu machen, tritt die Deutsche Atomkommission zwangsläufig etwas in den Hintergrund. Harte politische Entscheidungen können nicht die Sache von Fachgremien und einer Kommission von Repräsentanten sein. Statt dessen hat sich der für den Arbeitsbereich des Wissenschaftsministeriums verantwortliche Ausschuß des Deutschen Bundestags mehr und mehr als Kontroll- und Steuerungsorgan der Kernforschung und der kerntechnischen Entwicklung profiliert. Durch verschiedene Anhörungen – auch in Deutschland im allgemeinen als Hearings bezeichnet – hat er nicht unerheblich dazu beigetragen, die wichtigsten Projekte des deutschen Atomprogramms von der Sache her durchsichtiger zu machen. Eine spezielle Arbeitsgruppe dieses Bundestagsausschusses wiederum befaßt sich speziell mit der Kernenergie-Entwicklung.
Unter den Förderungsprogrammen des Bonner Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft ist das für Kernforschung und Kerntechnik das älteste. Das Ministerium wurde 1955 unter der Bezeichnung »Bundesministerium für Atomfragen« gegründet. Heute bilden Kerntechnik und Kernforschung innerhalb des Ministeriums eine von drei Unterabteilungen der Abteilung IV. Die benachbarten Sachgebiete dieser Abteilung sind Datenverarbeitung sowie Sicherheit kerntechnischer Anlagen und Strahlenschutz. Am Haushaltsvolumen gemessen stehen Kernforschung und kerntechnische Entwicklung aber vorerst immer noch an erster Stelle. Von den etwas über 4 Milliarden DM, die der Haushalt des Wissenschaftsministeriums für 1971 vorsieht, entfallen knapp 1,3 Milliarden DM auf Kernforschung und Kerntechnik. Davon erhalten die Kernforschungseinrichtungen in Karlsruhe, Jülich, München, Hamburg, Berlin und Darmstadt knapp die Hälfte, nämlich 565 Millionen DM. Zur Beschaffung von Kernbrennstoffen sieht der Haushalt 122 Millionen DM vor. Gleich groß sind die Beiträge der Bundesrepublik für internationale Organisationen und Projekte wie IAEO, CERN und das deutsch-französische Gemeinschaftsprojekt zum Bau eines Höchstflußreaktors in Grenoble. Für Arbeiten auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit sind im Haushalt 1971 etwa 16 Millionen DM vorgesehen.
Unter den vom Ministerium geförderten Kernkraftprojekten stehen der gasgekühlte Hochtemperaturreaktor und der natriumgekühlte Schnelle Brüter sowie die Weiterentwicklung des nuklearen Brennstoffkreislaufs an erster Stelle. Die mittelfristige Finanzplanung sieht vor, den Gesamthaushalt des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft bis 1974 auf 9 Milliarden DM aufzustocken. Dabei soll der prozentuale Anteil von Kernforschung und -technik absinken und nur auf knapp 1,5 Milliarden DM ansteigen, und die Kernforschungszentren sollen verstärkt auch nichtnukleare Forschungsarbeiten aufgreifen.

Die Rolle der großen deutschen Kernforschungszentren ist gleichfalls nur zum Teil der Rolle vergleichbar, die Zentren dieser Art in den USA, Großbritannien, Frankreich und Kanada in der Vergangenheit gespielt haben und heute zum Teil noch spielen. So ist eine detaillierte Entwicklung von Reaktoren und Kernkraftwerken nie in den deutschen Zentren betrieben worden, sieht man vom FR 2, dem ersten deutschen Reaktor, ab. Trotzdem hat man sich in den deutschen Zentren natürlich nicht nur auf die Behandlung physikalischer Probleme beschränkt. Man ist auch in die Reaktortechnologie eingestiegen, zum Beispiel in Jülich in die Hochtemperatur-Reaktortechnologie oder in Karlsruhe in die des Schnellbrüters. Aber auch bei den technologischen Fragen hat man sich stets auf die Bearbeitung der Grundlagen beschränkt und die detaillierte Projektierung der Reaktoren und Prototypanlagen der Industrie überlassen. Daneben betreiben diese Zentren sehr viel echte Kernforschung mit allen Randgebieten in Richtung Festkörper- und Plasmaphysik, Biologie und Medizin, Datenverarbeitung und Tieftemperaturforschung. Das Deutsche Elektronensynchrotron (DESY) in Hamburg und das in Darmstadt im Aufbau befindliche Zentrum für Schwerionen-Physik widmen sich ausschließlich der physikalischen Grundlagenforschung.
Kernforschungszentren im engeren Sinn – und mit je etwa 3500 Angestellten die größten ihrer Art – wurden in Karlsruhe und Jülich errichtet. Für die Entwicklung des nuklearen Schiffsantriebs entstand ein kleineres Zentrum in der Nähe von Hamburg, in Geesthacht. Aus Aufgaben des Strahlenschutzes heraus hat sich vor den Toren Münchens, in Neuherberg, das vom Wissenschaftsministerium getragene Zentrum der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung entwickelt. Mit seinen auswärtigen Einrichtungen umfaßt es heute 18 Institute mit fast tausend Mitarbeitern. Dabei steht die Erforschung der Einflüsse von energiereicher Kernstrahlung und von chemischen Substanzen auf Lebensvorgänge immer noch im Zentrum des Interesses. Weiterhin gehört zu den fast ausschließlich durch das Wissenschaftsministerium finanzierten großen Kernforschungszentren das Institut für Plasmaphysik der Max-Planck-Gesellschaft in Garching, gleichfalls vor den Toren Münchens. Sein Fernziel ist der Fusionsreaktor.
Alle Kernforschungseinrichtungen des Bundes zusammen beschäftigen etwa 10000 Mitarbeiter, darunter etwa 2000 Wissenschaftler. Bis Anfang 1970 hatten Bund und Länder in diesen Zentren ohne die großen Versuchsanlagen insgesamt etwa 1,2 Milliarden DM investiert und für ihren Betrieb weitere 1,7 Milliarden DM aufgebracht.

... bis hin zur wirtschaftlichen Integration

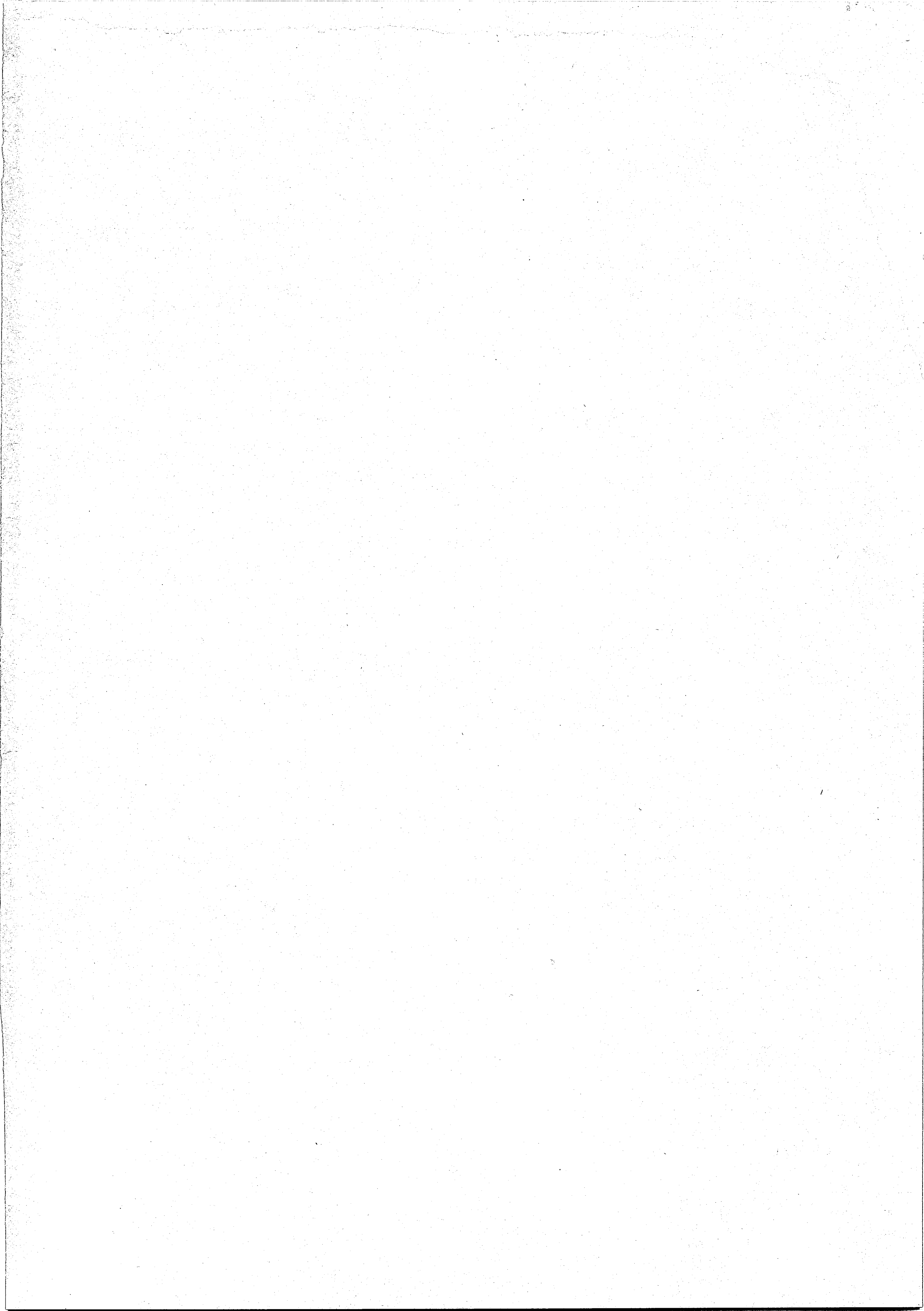
In der Anfangszeit halfen der jungen deutschen Kernforschung und Kernindustrie sehr die Informationsmöglichkeiten, die die Zentren der Atom-Großmächte, insbesondere der USA, boten. Viele Ingenieure und Wissenschaftler, die heute in Deutschland auf diesen Gebieten eine leitende Position bekleiden, hatten seinerzeit in Brookhaven, Argonne oder Stanford zum erstenmal Gelegenheit, wichtige Erfahrungen auf ihrem neuen Fachgebiet zu sammeln.
Doch mit der gleichen Großzügigkeit stellt die Bundesrepublik heute ihre kerntechnischen Erfahrungen jungen Staaten zur Verfügung, die jetzt – wie damals die Bundesrepublik – die ersten Schritte ins Neuland der Kernkrafterschließung wagen. So bestehen Regierungsabkommen zur Zusammenarbeit in Kernforschung und kerntechnischer Entwicklung mit Argentinien, Brasilien, Chile und Spanien. Im Frühjahr 1971 erregte ein Vertrag zur Zusammenarbeit mit Japan bei der Schnellbrüterentwicklung Aufsehen. Das deutsche Schnellbrüterprojekt war schon vorher durch eine direkte Beteiligung der Benelux-Länder

internationalisiert worden. Mit Großbritannien und den Niederlanden besteht eine enge Zusammenarbeit bei der Gaszentrifugen-Entwicklung zur Urananreicherung.
Als erstes ausländisches Forschungszentrum konnte sich schließlich die Gesellschaft für Kernforschung in Karlsruhe an einem amerikanischen Reaktorprojekt beteiligen, an der Entwicklung des schnellen dynamischen Testreaktors SEFOR. Er wurde im US-Staat Arkansas, in der Nähe von Fayetteville, bei Gesamtkosten von 25 Millionen Dollar errichtet. Für einen Kostenanteil von 5 Millionen Dollar, die zum Teil aus dem Budget der Europäischen Atomgemeinschaft aufgebracht wurden, hat das Karlsruher Zentrum die Möglichkeit gehabt, auf das Experimentierprogramm dieses Projekts einzuwirken. Mit eigenen Mitarbeitern nimmt es jetzt an den Experimenten in Fayetteville teil. Diese sind für die Beurteilung der Sicherheit künftiger Schnellbrüter-Kernkraftwerke von großer Bedeutung. – Mit Frankreich gemeinsam baut die Bundesrepublik Deutschland einen Höchstfluß-Reaktor in Grenoble.
Ursprünglich sollte einmal vor allem die Europäische Atomgemeinschaft für die internationale Verflechtung kerntechnischer Projekte sorgen – zumindest unter den Partnerstaaten des Gemeinsamen Markts. Während der ersten Jahre ihrer Tätigkeit hat die Europäische Atomgemeinschaft auch sehr segensreich in dieser Richtung wirken können. Daß diese Entwicklung 1967 abbrach und die Gemeinschaft in eine schwere Krise geriet, ist gerade von deutscher Seite stets bedauert worden, und es hat in Deutschland auch nicht an Versuchen gefehlt, diese Krise zu überwinden. Unterdessen haben sich Kernforschung und Kerntechnik jedoch so schnell weiterentwickelt, daß für die Europäische Gemeinschaft im wesentlichen nur noch Forschungsarbeiten interessant sind, die über Kernforschung und Kerntechnik wesentlich hinausführen, also vor allem nichtnukleare Gebiete umfassen.
Im gleichen Maße, wie sich in der Bundesrepublik die Erkenntnis durchgesetzt hat, daß Forschung nicht nur auf neue Grundlagenerkenntnisse abzielen kann, sondern auch der technischen und wirtschaftlichen Entwicklung dienen muß, wurde auch der Wunsch wach, internationale Forschungsprojekte in eine wirtschaftliche Integration einmünden zu lassen. Mit dem Bau des Schnellbrüter-Prototypkraftwerks SNR-300 durch ein internationales Industriekonsortium der Benelux-Länder und der Bundesrepublik im Auftrag eines gleichartig international zusammengesetzten Konsortiums von Stromversorgungsunternehmen wird ein Schritt in diese Richtung getan. Weitere sollten folgen. Internationale Zusammenarbeit ist für die Bundesrepublik mehr als ein unverbindliches Schlagwort.

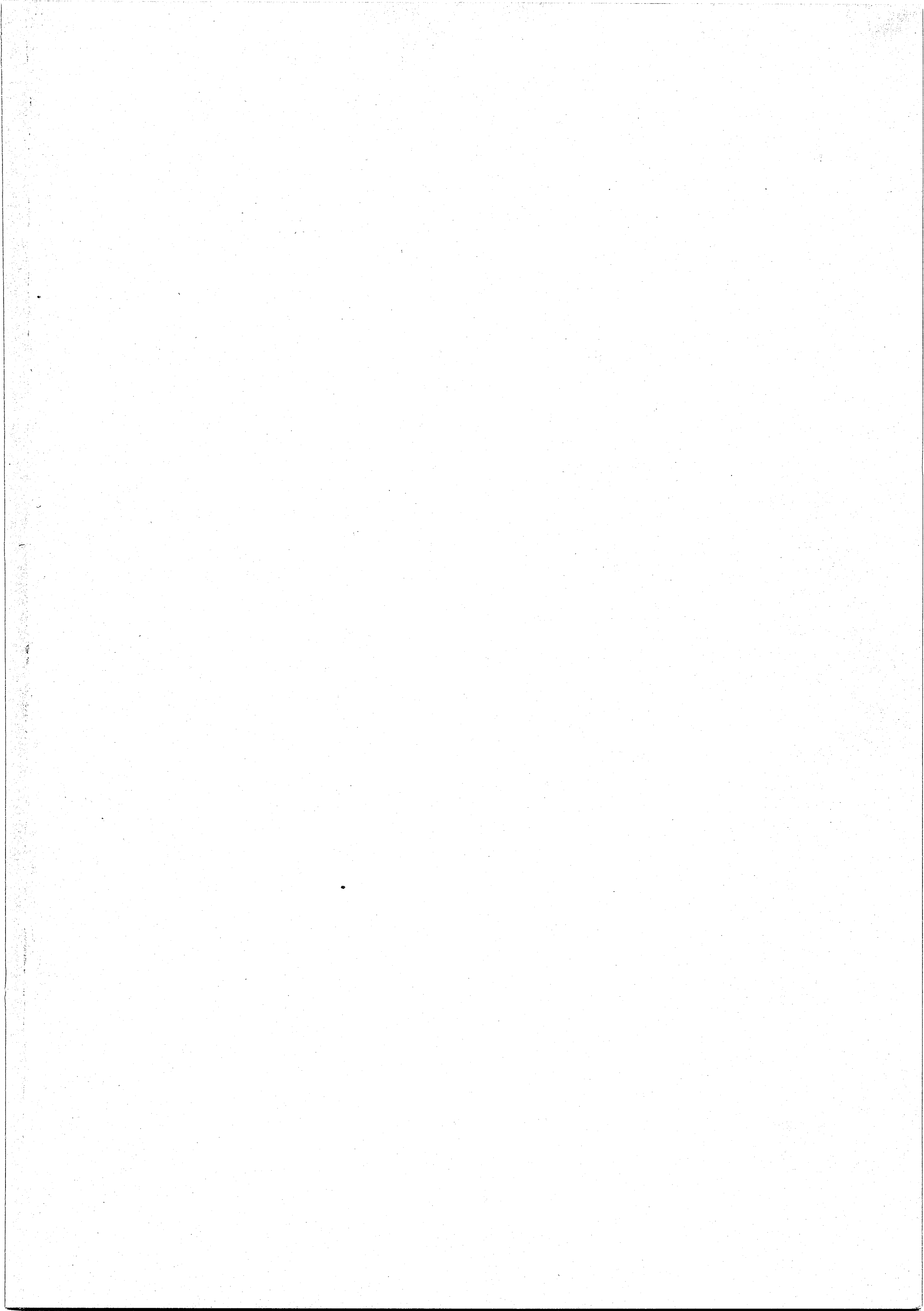
Liste der deutschen Kernkraftwerke und Kernkraftwerksprojekte

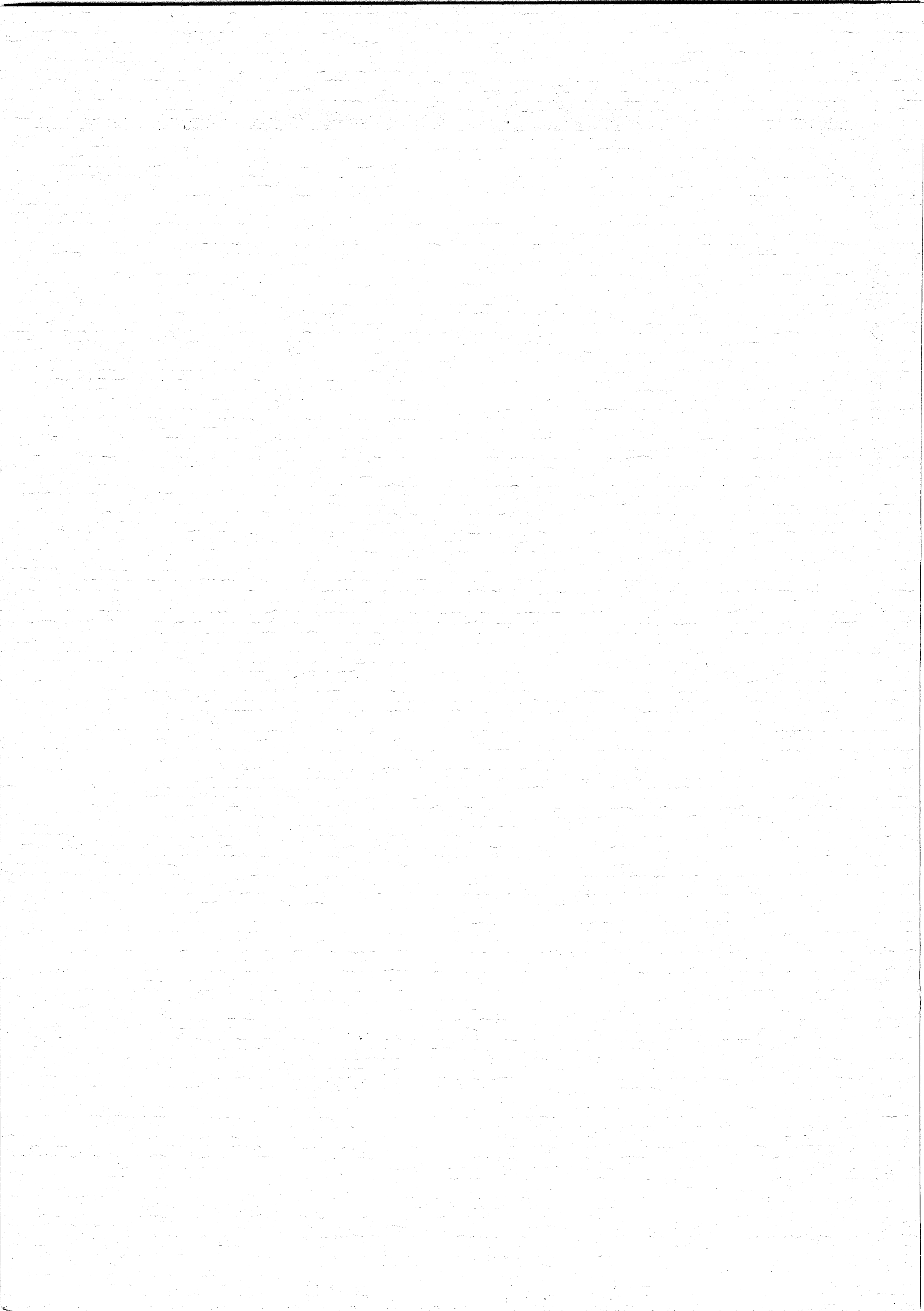
Bezeichnung und Standort	Leistung in MW	Reaktortyp	Entwicklungsstand (Sommer 1971)
Versuchsatomkraftwerk Kahl	15	Siedewasser	seit 1960 in Betrieb, umgebaut für die Erprobung von Überhitzer-Brennelementen
Mehrzweck-Forschungsreaktor, Kernforschungszentrum Karlsruhe	50	Schwerwasser-Druckkessel	seit 1966 in Betrieb
Kernkraftwerk RWE-Bayernwerk, Gundremmingen/Donau	240	Siedewasser	seit 1966 in Betrieb
Atomversuchsreaktor (AVR), Kernforschungsanlage in Jülich	15	Hochtemperatur mit kugelförmigen Brennelementen	seit 1967 in Betrieb
KWL, Lingen/Ems	250	Siedewasser mit ölbeheiztem Dampferhitzer von 90 MW	seit 1968 in Betrieb
KWO, Obrigheim/Neckar	324	Druckwasser	seit 1968 in Betrieb
Heißdampfreaktor (HDR), Großwelzheim/Main	25	Siedewasser mit integrierter nuklearer Dampfüberhitzung	seit Ende 1970 in Betrieb
Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK), Kernforschungszentrum Karlsruhe	20	Zirkonhydrid-Moderation und Natriumkühlung	Inbetriebnahme mit thermischem Core für Herbst 1971 vorgesehen, später Umbau für schnelles Core
KKN, Niederaichbach/Isar	100	Schwerwasser-Moderation und Gaskühlung (CO_2), vertikale Druckröhrenkonstruktion	Inbetriebnahme 1971/72
KKS, Stade/Elbe	660	Druckwasser	in Bau, Inbetriebnahme voraussichtlich Ende 1971 bis Anfang 1972

Bezeichnung und Standort	Leistung in MW	Reaktortyp	Entwicklungsstand (Sommer 1971)
KKW, Würgassen/Weser	670	Siedewasser	in Bau, Inbetriebnahme voraussichtlich Ende 1971 bis Anfang 1972
KKB-1, Biblis/Rhein	1200	Druckwasser	in Bau, Inbetriebnahme für Ende 1973 vorgesehen
Brunsbüttel/Elbe	805	Siedewasser	in Bau, Inbetriebnahme voraussichtlich 1974
KKP-1, Philippsburg/Rhein	900	Siedewasser	in Bau, Inbetriebnahme voraussichtlich 1974
Thorium-Hochtemperatur-Prototyp-Kernkraftwerk (THTR-300), Uentrop-Schmehausen/Westfalen	300	Hochtemperatur mit kugelförmigen Brennelementen	Baubeginn für Mitte 1971, Inbetriebnahme für 1976 vorgesehen
Schnelles Natriumgekühltes Prototyp-Kernkraftwerk (SNR-300), Kalkar/Rhein	300	natriumgekühlter Schneller Brüter	Angebot abgegeben, Bauentscheidung voraussichtlich Ende 1971, Inbetriebnahme 1977/78
Gemeinschaftskraftwerk Neckar (GKN), Neckarwestheim	775, davon 150 für Bahnstrom ($16^2/_3$ Hz)	nicht entschieden	Baubeschluß Frühjahr 1971, Baubeginn voraussichtlich Ende 1971, Inbetriebnahme für 1975 vorgesehen
Kernkraftwerk Isar, Ohu, Kreis Landshut	etwa 900	Siedewasser	Baubeginn für Ende 1971 vorgesehen, Fertigstellung etwa 1976/77
Philippsburg-2	900	Siedewasser	Baubeginn Anfang 1972, Inbetriebnahme 1977
Unterweser, voraussichtlich Esensham	1300	Druckwasser	Baubeginn voraussichtlich Ende 1971, Inbetriebnahme 1975/76
Biblis-2	1300	Leichtwasser	Baubeginn voraussichtlich Ende 1971 oder Anfang 1972, Inbetriebnahme voraussichtlich 1976/77




Bremen
Lingen
Hannover
Uentrop
Würgassen
Köln
Jülich (AVR)
Kahl
Frankfurt
Großwelzheim
Philippsburg
Biblis
Obrigheim
Stuttgart
Karlsruhe
(MZFR + KNK)
Gundremmingen
München
Niederaichbach





Überall auf der Welt werden heute Kernkraftwerke gebaut — mit der gleichen Selbstverständlichkeit wie bisher Kohle- und Öl-Kraftwerke. Doch ist das nur der Anfang: Schon arbeitet man an Hochtemperatur-, Brüter- und Fusionsreaktoren, den Grundlagen künftiger Kraftwerksgenerationen; schon sucht man nach weiterführenden Anwendungsmöglichkeiten der Kernenergie, etwa zur Meerwasserentsalzung, Erzverhüttung oder als Grundlage chemischer Prozesse. So bietet die Kernkraft den hochtechnisierten Staaten wie den Entwicklungsländern gleichermaßen eine neue Chance zur Lösung ihrer wirtschaftlichen Probleme.



Robert Gerwin, geboren 1922, hat wie kaum ein zweiter deutscher Wissenschaftspublizist in zahllosen Zeitungs- und Zeitschriftenbeiträgen, Rundfunkberichten und Fernsehdokumentationen die Entwicklung der Kernforschung und Kerntechnik beschrieben. Er lebt heute als freier Publizist in der Nähe von München.

02262